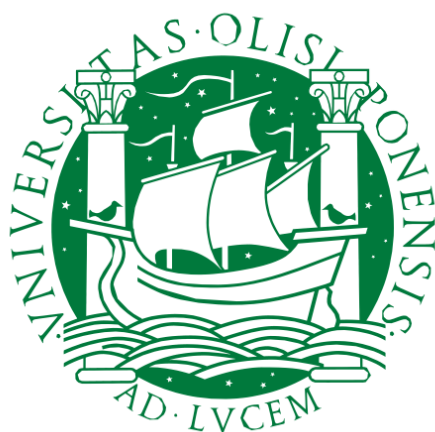


UNIVERSIDADE DE LISBOA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA E ORDENAMENTO DO
TERRITÓRIO



Modelação Geográfica e superfícies de adequabilidade à
presença do nemátodo da madeira do pinheiro
***Bursaphelenchus xylophilus* em Portugal Continental**

JOSÉ PEDRO GONÇALVES DOS SANTOS

MESTRADO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E
MODELAÇÃO TERRITORIAL APLICADOS AO ORDENAMENTO

2012

UNIVERSIDADE DE LISBOA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA E ORDENAMENTO DO
TERRITÓRIO



**Modelação Geográfica e superfícies de adequabilidade à
presença do nemátodo da madeira do pinheiro
Bursaphelenchus xylophilus em Portugal Continental**

JOSÉ PEDRO GONÇALVES DOS SANTOS

**MESTRADO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E
MODELAÇÃO TERRITORIAL APLICADOS AO ORDENAMENTO**

Dissertação orientada pelo Prof. Doutor Eusébio Joaquim Marques dos Reis

2012

Resumo

O *Bursaphelenchus xylophilus*, mais conhecido por Nemátodo da Madeira do Pinheiro (NMP), foi introduzido em Portugal Continental no ano de 1999. Esta espécie, nativa dos Estados Unidos da América, chegou a Portugal através de madeira infetada proveniente dos países asiáticos, nomeadamente do Japão, país onde o nemátodo tem causado grandes prejuízos a nível económico e ambiental. A distribuição deste verme microscópico em Portugal Continental é feita através do vetor *Monochamus galloprovincialis*, sendo o hospedeiro a espécie *Pinus pinaster* com uma grande área de ocupação em Portugal. Com o intuito de calcular a adequabilidade de presença do NMP em Portugal Continental foram integradas, em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), diversas variáveis espaciais consideradas representativas de fatores que influenciam a adequabilidade ao NMP, assim como a sua dispersão: temperatura (máxima média do trimestre mais quente e mínima média do trimestre mais frio), densidade de áreas florestais de coníferas, precipitação anual média e distância às estradas. Com base nestas variáveis espaciais, foram produzidos diversos modelos - de adequabilidade climática e bioclimática, de expansão, correlativo e gravítico (neste, com a utilização adicional da atividade madeireira por concelho) - baseados em dados de áreas afetadas e de dados de presença. Os resultados dos vários modelos permitiram obter diferentes níveis de adequabilidade à presença do NMP e determinar as áreas mais suscetíveis à sua ocorrência futura. Constata-se que o território de Portugal Continental é, em geral, propício ao desenvolvimento e expansão do NMP; no entanto, o padrão da sua evolução temporal e espacial só pode ser compreendido através da integração da atividade humana, como fator difusor desta espécie invasiva.

Palavras-Chave: adequabilidade de habitat; *Bursaphelenchus xylophilus*; *Monochamus galloprovincialis*; Sistemas de Informação Geográfica (SIG); modelação geográfica.

Abstract

The *Bursaphelenchus xylophilus*, commonly known as Pine wood nematode (PWN), has reached Portugal in 1999. This specie, native to the United States, arrived in Portugal through infected wood from Asian countries, including Japan, at country where the nematode has caused great economic and environmental damages. The distribution of this microscopic worm in Portugal is done through the vector *Monochamus galloprovincialis*, being the *Pinus pinaster* the host species, with a large distribution in Portugal. In order to calculate the suitability for the presence of PWN in Portugal, several spatial variables considered representative of factors that influence suitability to PWN, as well as its dispersion, were integrated in Geographic Information Systems (GIS): temperature (average maximum the quarter and warmer minimum quarterly average colder), density of conifer forests, average annual precipitation and distance to roads. Based on these spatial variables, several models were produced - the climate and bioclimatic suitability, expansion, correlative and gravity (in this, with the additional use of logging by municipality) - based on data from the affected areas and presence data. The results of the various models have enabled different levels of suitability to the presence of PWN and determine the most susceptible areas to PWN future occurrence. It is noted that the mainland Portugal is generally propitious to the development and expansion of PWN, however, the pattern of their temporal and spatial evolution can only be understood through the integration of human activity, as a diffuser factor of invasive species.

Keywords: ecological niche, *Bursaphelenchus xylophilus*, *Monochamus galloprovincialis*, Geographic Information Systems (GIS), geographic modeling.

Índice Geral

Resumo	i
Abstract.....	ii
Índice de Quadros	v
Índice de Figuras	vi
Lista de Abreviaturas.....	vii
Agradecimentos	viii
Introdução	1
Capítulo 1 – O nemátodo da madeira do pinheiro: breve caraterização.....	3
1.1. Nemátodo da Madeira do Pinheiro: origem e dispersão.....	4
1.2. Características Biológicas.....	5
1.2.1. Taxonomia	5
1.2.2. Ciclo de vida e biologia	6
1.3. Fatores de adequabilidade e de dispersão.....	8
1.4. Áreas afetadas em Portugal Continental.....	9
1.5. O inseto vetor <i>Monochamus</i> e a transmissão do <i>Bursaphelenchus xylophilus</i>	14
1.6. Vetores do <i>Bursaphelenchus xylophilus</i> no Continente Europeu e em Portugal Continental.....	15
Capítulo 2 – Modelos de Adequabilidade de <i>Habitat</i> e Expansão para o <i>Bursaphelenchus Xylophilus</i> em Portugal Continental	16
2.1. Introdução	17
2.2. Modelos de distribuição de espécies	18
2.2.1. Modelos mecanicistas e modelos correlativos.....	19
2.3. Nicho ecológico das espécies pertencentes aos géneros <i>Monochamus</i> e <i>Bursaphelenchus</i>	21
2.4. Seleção de Variáveis Independentes a incluir no modelo	22
2.4.1. Aquisição de Informação.....	23
2.5. Descrição das variáveis utilizadas para o modelo de adequabilidade	25
2.5.1. Densidade de áreas florestais de coníferas	25
2.5.2. Temperaturas extremas médias	26
2.5.3. Precipitação anual.....	28
2.5.4. Distância às Estradas	29

2.6. Elaboração e validação dos Modelos Mecanicistas e Correlativos	30
2.6.1 Adequabilidade Climática e Adequabilidade Bioclimática.....	30
2.6.2 Modelação da expansão do NMP a partir do local de contágio	36
2.6.3. Modelo Correlativo Máxima Entropia	41
Capítulo 3 – Modelo Gravítico de atração do Nemátodo da Madeira do Pinheiro: breve ensaio	49
3.1. Introdução	50
3.2. Modelo Gravítico.....	50
Capítulo 4 – Considerações finais	56
Referências bibliográficas	61

Índice de Quadros

Quadro I – Concelhos afetados pelo NMP em 2006, 2009 e 2011 organizados por NUT III (Fonte: Autoridade Florestal Nacional).....	11
Quadro II – Síntese de Informação Geográfica.....	24
Quadro III – Valores de ponderação atribuídos às classes das variáveis condicionantes.....	31
Quadro IV – Valores de ponderação atribuídos às classes da variável Densidade de Conífera.....	33
Quadro V - Percentagem de área afetada em cada uma das classes de adequabilidade para o modelo de adequabilidade climática.....	34
Quadro VI – Percentagem de área afetada em cada uma das classes de adequabilidade para o modelo de adequabilidade bioclimática.....	35
Quadro VII – Percentagem de área afetada em (2011) em cada uma das classes do Modelo de Superfície de Expansão.....	41
Quadro VIII – Grau de contribuição de cada uma das variáveis para a ocorrência do NMP, obtido a partir do <i>software</i> Maxent.....	45
Quadro IX – Percentagem de área afetada em cada uma das classes de adequabilidade para o modelo correlativo.....	46
Quadro X – Percentagem de área afetada (2011) em cada uma das classes do Modelo Correlativo de Custo.....	48
Quadro XI – Percentagem de área afetada em cada uma das classes de atratividade para o modelo gravítico.....	55

Índice de Figuras

Figura 1 – Interação entre o <i>Bursaphelenchus xylophilus</i> e o inseto vetor <i>Monochamus</i> ssp nas fases do ciclo de vida saprófita e patogénico.....	7
Figura 2 – Áreas (concelhos) afetadas (2006, 2009 e 2011).....	12
Figura 3 – Áreas potenciais afetadas pelo NMP em Portugal Continental (2006, 2009 e 2011).....	13
Figura 4A – Floresta de Coníferas em Portugal Continental: Distribuição espacial (CLC 2006).....	26
Figura4B - Densidade de Kernel, para um raio de 15 km.....	26
Figura 5A – Temperatura média em Portugal Continental, do trimestre mais frio para o período 1950-2000.....	26
Figura 5B – Temperatura média em Portugal Continental, do trimestre mais quente para o período 1950-2000.....	27
Figura 6 – Precipitação anual média em Portugal Continental para o período 1950-2000	28
Figura 7 – Distância às Estradas.....	29

Figura 8A - Adequabilidade Climática à presença do NMP: em valores contínuos.....	32
Figura 8B - Adequabilidade Climática à presença do NMP: classificada	32
Figura 9A - Adequabilidade Bioclimática à presença do NMP: em valores contínuos.....	35
Figura 9B - Adequabilidade Bioclimática à presença do NMP: classificada.....	35
Figura 10A – Superfície de distância-custo a partir do local de contágio, com base na variável Distância às Estradas	38
Figura 10B – Superfície de distância-custo a partir do local de contágio, com base no modelo Adequabilidade Bioclimática	38
Figura 11 – Superfície de expansão do NMP a partir do foco inicial de contágio, com base na conjugação da adequabilidade bioclimática e da distância às estradas	39
Figura 12 - Distribuição espacial de uma amostra aleatória de 10% dos dados de presença do NMP	43
Figura 13 - Valor da Área Abaixo da Curva para a Potencialidade do Modelo.....	44
Figura 14A - Probabilidade Preditiva de condições adequadas à presença do NMP em valores contínuos	46
Figura 14B – Probabilidade Preditiva de condições adequadas à presença do NMP classificada.....	46
Figura 15 - Superfície de distância-custo a partir do local de contágio, com base no modelo correlativo.....	47
Figura 16A –Valores em milhares de euros das Atividades Económicas da Indústria Madeireira por concelho.....	53
Figura 16B - Densidade de Atividade da Indústria Madeireira por concelho.....	53
Figura 17 – Modelo Gravítico.....	55

Lista de Abreviaturas

AAC	Área Abaixo da Curva
CLC	Corine Land Cover
EPPO	European and Mediterranean Plant Protection Organization
IGP	Instituto Geográfico Português
INE	Instituto Nacional de Estatística
ILWIS	Integrated Land and Water Information Systems
MDE	Modelos de Distribuição de Espécies
NMP	Nemátodo da Madeira do Pinheiro
PANCNMP	Programa de Ação Nacional para o Controlo do Nemátodo da Madeira do Pinheiro
PHRAME	Plant Health Risk And Monitoring Evaluation
PRODER	Programa de Desenvolvimento Rural
PROLUNP	Programa Nacional de Luta contra o Nemátodo da Madeira do Pinheiro
SIG	Sistema de Informação Geográfica

Agradecimentos

Esta dissertação não teria sido possível sem o contributo de algumas pessoas que, quer através dos seus conselhos quer através do seu apoio e força, me apoiaram em todos os momentos, particularmente nos mais difíceis, nomeadamente:

- ao meu orientador Professor Dr. Eusébio Reis que através dos seus conselhos, elevado conhecimento e apoio foi fundamental para a concretização do projeto;
- ao meu Professor, colega e amigo César Capinha pela grande ajuda, prontidão e conselhos que me elucidaram sobre diversos pontos da dissertação;
- ao Professor Dr. Manuel Mota pela importante ajuda em artigos bibliográficos e apoio científico;
- ao ex-colega de trabalho e Professor Marco Alegria que durante os breves intervalos das aulas me deu uma preciosa ajuda com diversos conceitos.
- aos meus colegas de trabalho Paulo Crisógono e Andrea Gambarotto pelos conselhos e opiniões sempre pertinentes;
- aos meus amigos de “carteira” Ricardo Brasil e Jorge Grazina pelos bons tempos de Faculdade e ajuda inquestionável na elaboração da dissertação;
- à minha namorada Carina, a ela devo o sucesso que tenho alcançado nos últimos 8 anos. O apoio que me deu na dissertação com as suas pertinentes opiniões foi fundamental para o melhoramento da mesma;
- aos meus pais, a eles devo a minha existência, e tudo o que sou hoje. Obrigado por estarem sempre presentes;
- à minha família, principalmente à minha irmã, cunhado e avó, o meu obrigado;
- à duas pessoas que, embora não estejam presentes fisicamente, estarão para sempre no meu coração.

Que nunca por vencidos se conheçam

Introdução

Com o aumento da globalização e a quebra das fronteiras físicas, novas invasões biológicas, por espécies não indígenas, tornaram-se um problema ambiental mundial, causando, por diversas vezes, ruturas ecológicas em vários ecossistemas, com graves consequências económicas (Liebhold *et al.*, 1995; Sakai *et al.*, 2001 *cit.* em Mota *et al.*, 2009).

Um exemplo da quebra da influência das fronteiras físicas foi a disseminação do Nemátodo da Madeira do Pinheiro (NMP) *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner & Buhner, 1934) Nickle, 1970, espécie nativa dos Estados Unidos da América, para países tais como Japão, China, Coreia e Portugal.

Em Maio de 1999, o NMP foi detetado em Portugal, na zona marítima da Península de Setúbal, proveniente de madeira importada dos países asiáticos (PROLUNP, 2000). O NMP, como verme microscópico, necessita de um vetor para ser transferido entre árvores. Nas áreas do globo onde o *Bursaphelenchus xylophilus* existe, o *Monochamus spp* tem o papel mais importante como vetor do nemátodo (Tomiczek *et al.*, 2008). Em Portugal, atualmente, foram identificadas duas espécies do género *Monochamus*: o *Monochamus galloprovincialis*, vulgarmente designado por Longicórneo do pinheiro, e o *Monochamus sutor* (Hellrigl, 1971 *cit.* em Rodrigues, 2008).

O estudo da distribuição geográfica e do comportamento biológico do inseto vetor e do ciclo de desenvolvimento do nemátodo é importante para definir áreas de maior adequabilidade de presença da espécie, já que transmitem o conhecimento teórico necessário para a definição e ponderação das variáveis físicas a integrar os modelos de distribuição de espécies (MDE).

O objetivo desta dissertação é definir áreas de diferente adequabilidade à presença do NMP de forma a identificar áreas onde as condições naturais e humanas são mais adequadas para o aparecimento e expansão da espécie invasora, através de modelos mecanicistas, correlativos e de atração (gravítico).

No capítulo I será efetuada uma abordagem científica teórica à espécie invasora, nemátodo da madeira do pinheiro, e ao inseto vetor *Monochamus galloprovincialis*.

No capítulo II serão elaborados os modelos de adequabilidade à presença do NMP, nomeadamente mecanicistas - adequabilidade climática, bioclimática e expansão - baseados no conhecimento fisiológico da espécie, e um modelo correlativo de adequabilidade, o qual, ao contrário dos modelos mecanicistas, utiliza dados de presença como *input*.

No capítulo III será calculado um modelo alternativo e simplificado, baseado na atração (modelo gravítico de Huff) da densidade da atividade de produção madeireira, Adequabilidade Bioclimática e na distância às estradas, na qual se definem as áreas com maior probabilidade para a presença do nemátodo.

No IV e último capítulo são feitas as considerações finais, nomeadamente uma análise final dos resultados obtidos pelos modelos de adequabilidade, expansão e gravítico.

Capítulo 1 – O nemátodo da madeira do pinheiro: breve caracterização

1.1. Nemátodo da Madeira do Pinheiro: origem e dispersão

O nemátodo do pinheiro da madeira (NMP), cujo nome científico é *Bursaphelenchus xylophilus*, é um organismo saprófita da família *parasitaphelenchidae* (PHRAME, 2007). Esta espécie é nativa da América do Norte, ocorrendo no Canadá, Estados Unidos da América e México. A expansão do nemátodo em áreas não endémicas foi, primeiramente, associado a várias hipóteses relacionadas com atividades humanas, especialmente pelo transporte de madeira infetada a todas as distâncias (Mota *et al.*, 2009).

No Japão, o nemátodo foi introduzido no princípio do século XX e propagou-se para a Ásia continental (China e Coreia) nos anos 80. A deteção do NMP em Portugal ocorreu no ano de 1999, em que a rápida ação governamental conteve a praga, temporariamente, numa pequena área a sudeste de Lisboa (Mota *et al.*, 2009), apesar das grandes quantidades de indivíduos afetados (Mota *et al.*, 1999). A gravidade da situação originou uma ação rápida da administração pública, tendo como principal objetivo restringir, a nível geográfico, a expansão da espécie, nomeadamente através da elaboração de um quadro legislativo específico e da elaboração do Programa Nacional de Luta Contra o Nemátodo do Pinheiro (PROLUNP). Todavia, estas ações não foram suficientes para evitar a propagação da espécie a parte do território nacional.

O NMP, quando introduzido num país com uma população nativa de *Monochamus* dispõe de um inseto vetor. O género *Monochamus* é constituído por um conjunto de espécies de insetos saprófitas, que fazem parte do ecossistema florestal, e que mantêm uma relação simbiótica de comensalismo com o agente patogénico NMP. O resultado final desta simbiose é uma população de nemátodos que não pode ser erradicada e uma doença, murchidão dos pinheiros, que pode ser controlada mas na realidade dificilmente suprimida (Mota *et al.*, 2009). Em ecossistemas florestais, o NMP é considerado um dos mais importantes agentes patogénicos do mundo. O receio geral do aparecimento do nemátodo, o agente causador da doença da murchidão dos pinheiros, nos países onde as florestas de coníferas assumem grande importância, é relacionado com o dano e a devastação que aquele causa (Mamiya, 2004; Mota & Vieira, 2008; Shin & Han, 2006, cit. em Mota *et al.*, 2009).

De acordo com a *European and Mediterranean Plant Protection Organization* (EPPO), 1999, o *Bursaphelenchus xylophilus* é encontrado, principalmente, no género *Pinus* spp. Ainda de acordo com esta entidade europeia, apenas um número limitado de *Pinus* é suscetível ao ataque deste nemátodo enquanto espécies vivas; entre elas, no Oriente, as espécies *P. bungeana*, *P. densiflora*, *P. luchuensis*, *P. massoniana* e *P. thunbergii* (nos seus habitats naturais) e as espécies europeias *P. nigra*, *P. sylvestris* e *P. pinaster*. Apesar de este conjunto de árvores ser o principal hospedeiro do nemátodo, este não se encontra limitado apenas a estas. Em alguns casos, árvores que apresentem sinais de declínio (vulgo secas ou a secar) ou que tenham uma idade avançada, por motivos independentes da presença do nemátodo, são importantes hospedeiros ou fator de atração para o inseto vetor (Bain e Hosking, 1988 cit. em Sathyapala, 2004). Em Portugal, a espécie *Pinus pinaster*, devido ao facto de ser muito suscetível à contaminação pelo nemátodo (Sousa *et al.*, 2009), é a que tem sofrido as maiores consequências com a doença da marchitidão do pinheiro.

Todavia, de acordo com o *Plant Health Risk And Monitoring Evaluation* (PHRAME), 2007, a espécie *Pinus pinea* não seria suscetível ao ataque do inseto vetor, devido ao facto de este ser incapaz de se alimentar e reproduzir nesta espécie de árvore; no entanto, ainda segundo a mesma entidade, resultados obtidos recentemente por M. Mota (não publicados à data da elaboração do relatório da PHRAME) afirmam que o NMP é capaz de invadir, multiplicar e infestar a espécie *P. pinea* causando a sua morte.

1.2. Características Biológicas

1.2.1. Taxonomia

Bursaphelenchus xylophilus é uma espécie microscópica (menos de 1mm de comprimento), sendo as suas características taxonómicas consistentes com as características gerais da ordem dos nemátodos *Aphelenchida* (Sathyapala, 2004). Em termos de taxonomia da espécie, segundo Sathyapala (2004), esta pode ser classificada nas seguintes categorias: Classe *Secernentea*; Subclasse *Diplogasteria*; Ordem *Aphelenchida*; Subordem *Aphelenchina*; Família *Aphelenchoididae*; Subfamília *Bursaphelenchinae*.

A terminologia científica adotada para o nemátodo do pinheiro variou, ao longo dos anos, em função da evolução do conhecimento científico da espécie. Aquando da descoberta da espécie por Steiner em 1929, publicado por Steiner e Buhner em 1934 (Dwinell *et al.*, 2004), foi atribuído o nome científico de *Aphelenchoides xylophilus* sendo mais tarde alterado o nome, por Nickle em 1970, para *Bursaphelenchus xylophilus* (Cram *et al.*, sd). Atualmente, existe um nome científico concreto – *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner & Buhner, 1934) 1970 Nickle – e dois sinónimos associados ao nemátodo do pinheiro (EPPO, 1999): *Aphelenchoides xylophilus* (Steiner & Buhner, 1934) e *Bursaphelenchus lignicolus* (Mamiya & Kiyohara, 1972).

1.2.2. Ciclo de vida e biologia

A descrição dos processos biológicos e do ciclo de vida é baseada na bibliografia de Cram e Hanson (SD). Segundo estes autores, o NMP tem dois ciclos de vida: o ciclo propagativo e o ciclo de dispersão (Figura 1). O ciclo propagativo ocorre na seiva da árvore infetada e envolve seis fases de desenvolvimento: o ovo, quatro estados de larva e, por fim, a fase adulta. A sequência de transformação de ovo para adulto demora, apenas, 4 a 5 dias sob condições favoráveis de temperatura e disponibilidade de nutrientes. A primeira fase ocorre dentro do ovo, seguido por incubação para a segunda fase que, rapidamente, passa para uma terceira fase. Tal como os autores indicam, existem duas formas na terceira fase: 1) Larvas que mudam para quarta fase que, eventualmente, alteram para adulto permanecendo nas árvores infetadas; 2) Fase de dispersão.

O desenvolvimento do nemátodo altera para o modo de dispersão na última fase de infecção da árvore e, após a morte da mesma, inicia a fase de dispersão através do inseto vetor. Nesta terceira fase em estado de larva, o nemátodo é transportado na parede da câmara papal do inseto vetor e, em seguida, muda para *dauerlarvae*. O *dauerlarvae* é uma fase de “não alimentação” da larva em que esta é especializada para sobreviver durante a fase de transporte permitindo, desta forma, a sua distribuição por intermédio do inseto vetor. Na quarta e última fase em estado de larva, de acordo Cram e Hanson (SD), esta entra no sistema respiratório do inseto vetor e, em seguida, é transportada pelo mesmo, principalmente, para as árvores *Pinus pinaster* ou outras árvores que

apresentem indícios ou sintomas de declínio. O *dauerlarvae* pode mudar para adulto num espaço de 48 horas após a sua transmissão para uma conífera.

O tempo de geração da espécie é de 6 dias a uma temperatura de 20°C e 3 dias a uma temperatura de 30°C (Mota *et al.*, 2009).

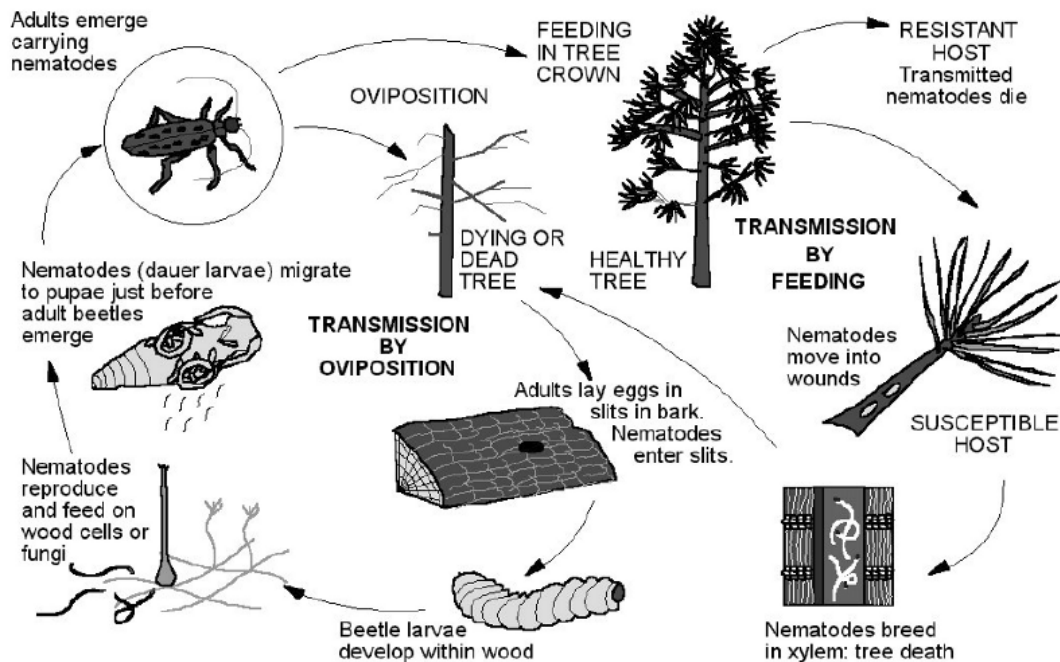


Figura 1 – Interação entre o *Bursaphelenchus xylophilus* e o inseto vetor *Monochamus* spp nas fases do ciclo de vida saprófita e patogénico (Mota *et al.*, 2009).

De acordo Cram e Hanson (SD) existem, atualmente, cerca de 50 espécies conhecidas de *Bursaphelenchus*. Apesar de todas as espécies pertencerem à mesma família, estas têm diferenças morfológicas, patogénicas e ocupam diferentes nichos. Todavia, apesar de as espécies terem características diferentes, algumas das espécies são bastante difíceis de diferenciar, devido ao facto de partilharem morfologias muito idênticas. Tanto a espécie *Bursaphelenchus xylophilus* como a espécie *Bursaphelenchus mucronatus* partilham diversas características morfológicas e, por vezes, são referidas como membros complexos da espécie nemátodo da madeira (Cram e Hanson, SD).

A presença da espécie do género *Bursaphelenchus* em Portugal não se cinge apenas à espécie *xylophilus*. Segundo um estudo de Penas *et al.*, (2004, cit. em PHRAME, 2007) na qual foram retiradas amostras na área que, até então, era considerada a zona afetada

(Península de Setúbal) e na área adjacente, foram identificadas 9 espécies do género *Bursaphelenchus* (*xylophilus*, *pinasteri*, *leoni*, *sexdentati*, *pinophilus*, *tusciae*, *hellenicus*, *teratospicularis*, *mucronatus*) sendo que, nesse ano, não fora identificada a espécie *xylophilus* na área adjacente à área afetada. O que difere a espécie *xylophilus* das restantes é que esta é o agente causador da doença "murchidão dos pinheiros" (Mota *et al.*, 1999).

1.3. Fatores de adequabilidade e de dispersão

Sendo uma espécie originária da América do Norte, a sua adequabilidade ao habitat das zonas geográficas em que ocorre é devido:

- condições climáticas favoráveis;
- às suas características biológicas (dimensões microscópicas, ciclo de vida curto, elevado potencial reprodutivo);
- à ocorrência de potenciais insetos vetores em vários continentes;
- à grande distribuição geográfica das espécies de coníferas suscetíveis;
- à inexistência ou reduzida eficácia de meios de controlo.

A adequabilidade de *habitat* à presença de uma espécie não nativa passa por oferecer as mesmas condições de *habitat* do meio de onde provém, sendo este fator essencial para a adaptação da espécie invasora e sua dispersão. Assim que uma espécie invasora se estabelece num novo habitat, pode ser extremamente difícil de erradicá-la, originando que os custos associados aos danos provocados e dos programas de controlo sejam bastante elevados (Okland *et al.*, 2010). O comportamento populacional destas espécies nos novos locais está geralmente revestido de elevada complexidade podendo, ou não, levar a comportamentos invasores (Capinha, 2008). A introdução e disseminação do nemátodo nas novas áreas devem-se à sua grande capacidade fenotípica¹, incluindo uma excelente adaptação, resistência no hospedeiro (por exemplo longos períodos de fome) e dispersão (PHRAME, 2007). O clima é também um fator bastante importante na disseminação da espécie; pesquisas efetuadas no Japão demonstraram que a distribuição

¹ Capacidade de um organismo alterar a sua morfologia em função do ambiente que o rodeia

do NMP está espacialmente correlacionada com variáveis climáticas (PHRAME, 2007). Um dos fatores com maior influência na distribuição geográfica do nemátodo é a temperatura, nomeadamente áreas com temperaturas médias compreendidas entre os 20° e os 30°C tendo, o NMP, um limiar máximo de sobrevivência que ronda, normalmente, 46°C (Dwinell, 2001) e um mínimo que ronda os 5°C, pois as condições de dispersão são mais favoráveis em climas com verões quentes, sendo, por isso, as áreas no Sul da Europa, onde as temperaturas médias no verão têm maiores valores, as mais ameaçadas (EPPO, 1999).

No que concerne à dispersão geográfica, tanto a nível local como mundial, existem, de acordo com Mota *et al.*, (2009), dois fatores principais:

- transporte de madeira contaminada por atividades humanas;
- desenvolvimento biológico do inseto vetor.

A sobreposição da distribuição do inseto vetor associado à atividade humana, na madeira transportada, originou a principal fonte de dispersão do NMP em Portugal (Mota *et al.*, 2009).

1.4. Áreas afetadas em Portugal Continental

A dispersão do nemátodo em Portugal Continental não ficou confinada apenas à região da Península de Setúbal, onde foi introduzida. Aquando a identificação da doença, e sendo definida pela União Europeia como um organismo prejudicial para plantas e produtos derivados (Rodrigues, 2008), foram desencadeados mecanismos legislativos, pela administração pública, com o objetivo de restringir a sua dispersão geográfica, de controlar e erradicar o NMP e, por fim, implementar medidas de monitorização da doença (Forestis, 2009). Nas áreas afetadas começou por ser definida uma estratégia fitossanitária, assente no programa PROLUNP, que incumbia a delimitação da área afetada para evitar a dispersão da doença, a eliminação das árvores em declínio e o controlo do inseto vetor (Rodrigues, 2008). Nesse âmbito foi criada a Portaria n.º 103/2006 de 6 de Fevereiro, na qual o território nacional foi dividido em 4 zonas:

- Zona Afetada (ZA) – Área onde foi detetada a presença do NMP;

- Zona Tampão (ZT) – Área que circunda a ZA em toda a sua extensão com uma largura que inicialmente foi estabelecida com 20 km;
- Zona de Restrição (ZR) – Área que corresponde à totalidade da ZA e da ZT;
- Zona Isenta (ZI) – Área que não é identificada como de ZR.

Posteriormente à introdução da portaria anterior houve necessidade de alterar a ZA e a ZR devido à contínua expansão da doença, o que obrigou à sua revisão passados poucos meses após a sua introdução, surgindo então a portaria nº 815/2006 com novas zonas ZA e ZR. Em 2008, após a deteção de novos focos de doença, agora no Centro do País, nomeadamente nos concelhos da Lousã e Arganil, foi introduzida a portaria n.º 553-B/2008 que alterava os limites da ZA e ZR passando estes a corresponder a todo o território nacional. Apesar destes esforços, a doença não foi contida e propagou-se por diversas zonas do País. Na sequência da contínua expansão do NMP em Portugal Continental, e das novas exigências de proteção fitossanitária decorrentes das decisões comunitárias adotadas em 2008 e 2009, foram aprovadas em Portugal diversas medidas extraordinárias de proteção fitossanitária tendo ainda sido criado um novo programa de ação específico designado por Programa de Ação Nacional para Controlo do Nemátodo da Madeira do Pinheiro (PANCNMP).

Para esta dissertação foi feito um levantamento, através da informação disponibilizada pela Autoridade Florestal Nacional (AFN) no âmbito do Programa de Desenvolvimento Rural (PRODER), dos concelhos afetados de acordo o decreto-lei nº 103/2006 e os editais de 2009 e 2011 (Quadro I). No ano em que foi elaborado o decreto-lei nº 103/2006, tinham sido identificados 15 concelhos (Ministério da Agricultura e do Desenvolvimento Rural e das Pescas, 2009). Nos editais da AFN de 2009 o número de concelhos com focos positivos ascendia a 23 (Quadro I), enquanto nos respetivos editais de 2011 o número de concelhos listados como “Locais de Intervenção”, ou seja, com focos positivos da presença do NMP, era já de 78 (Quadro I). Ou seja, esta informação indica uma clara expansão geográfica do NMP.

A informação reunida dos concelhos afetados nos diferentes anos (2006, 2009 e 2011) permitiu obter informação acerca das áreas afetadas pelo NMP em Portugal Continental e obter um padrão de distribuição (Figura 2). Os modelos desenvolvidos ao longo desta dissertação tiveram por base as áreas afetadas em 2006, 2009 e 2011. Posteriormente foi

utilizado o mapa *Corine Land Cover* (CLC) 2006 e respetiva nomenclatura (Caetano *et al.*, 2009) para, através da classe “312 - Florestas de Resinosas”, obter, de acordo com essa informação, a distribuição espacial das áreas com resinosas em cada um dos concelhos afetados. Com base neste procedimento, obtêm-se, assim, as áreas que se encontram ou que podem ser afetadas pelo NMP, ou seja, a área dentro dos concelhos afetados que possui florestas de resinosas.

Quadro I – Concelhos afetados pelo NMP em 2006, 2009 e 2011 organizados por NUT III
(Fonte: Autoridade Florestal Nacional)

NUT III	Concelhos		
	2006	2009	2011
Alto Trás-os-Montes		Boticas	
Baixo Mondego		Coimbra; Mealhada; Mira e Mortágua	Cantanhede e Penacova
Baixo Vouga			Águeda e Anadia
Beira Interior Sul			Castelo Branco
Cova da Beira			Covilhã e Fundão
Dão-Lafões		Carregal do Sal; Castro D’Aire; Mangualde; Penalva do Castelo; Santa Comba Dão e Tondela	
Médio Tejo			Ferreira do Zêzere e Ourém
Oeste		Nazaré e Torres Vedras	Alcobaça; Cadaval e Caldas da Rainha
Pinhal Interior Norte		Arganil; Castanheira de Pera; Góis; Lousã; Miranda do Corvo; Oliveira do Hospital e Pampilhosa da Serra	Penela; Tábua e Vila Nova de Poiares
Pinhal Interior Sul		Oleiros	Proença-a-Nova e Sertão
Pinhal Litoral		Porto de Mós	Leiria; Marinha Grande; Pombal e Ponte de Sor
Península de Setúbal	Alcochete; Barreiro; Moita; Montijo; Palmela; Seixal; Sesimbra e Setúbal		Almada
Alentejo Central	Montemor-o-Novo e Vendas Novas		
Alentejo Litoral	Alcácer do Sal; Grândola; Santiago do Cacém e Sines	Odemira	
Lezíria do Tejo	Benavente		Almeirim; Alpiarça; Azambuja; Chamusca; Coruche; Rio Maior e Salvaterra de Magos

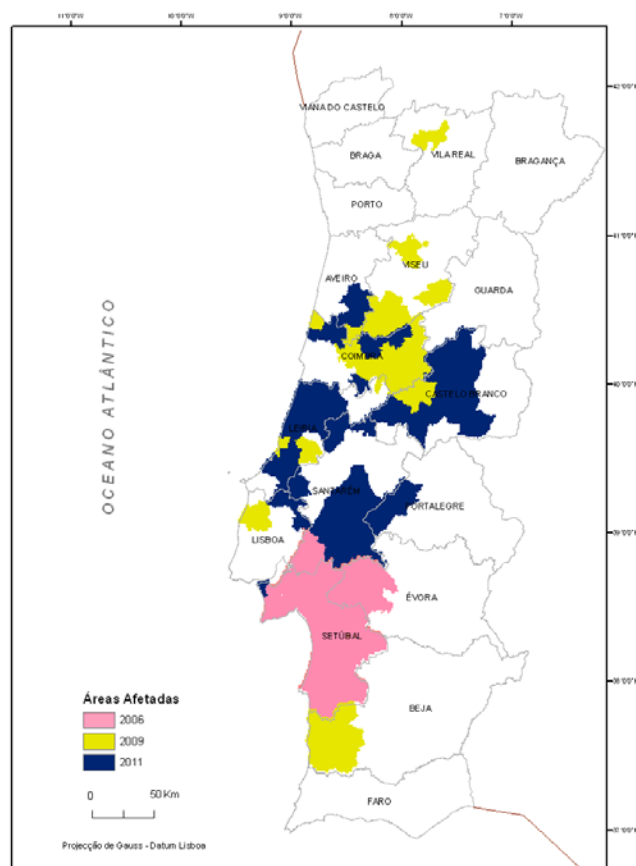


Figura 2 – Áreas (concelhos) afetadas (2006, 2009 e 2011).

A adoção deste procedimento possibilita a geração de resultados mais rigorosos, visto que, em muitos concelhos, a área ocupada por resinosas é muito baixa (veja-se, por exemplo, o concelho de Odemira), o que significa que apenas uma pequena fração do município está realmente afetada (Figura 3). Em todo o caso, e não havendo uma cartografia de pormenor das áreas afetadas disponível, deve-se reafirmar o facto das manchas representadas em cada concelho corresponderem, não a toda a área afetada, mas sim à junção das áreas afetadas com as áreas que poderão ser afetadas (tendo como referência o ano de 2006, 2009 e 2011).

Adicionalmente, há que ter em conta que, em algumas áreas, as manchas de resinosas cartografadas nos *Corine Land Cover* incorporam outras manchas de espécies do género *Pinus*, em particular o *Pinus pinea* (pinheiro manso), as quais podem ser muito menos suscetíveis à influência do nemátodo. Assim, a cartografia utilizada constitui uma aproximação à distribuição real, apenas compreendida e assumida tendo em conta a escala de análise, que engloba todo o território continental português.

Em relação à distribuição espacial e temporal do NMP, obtida com base nos procedimentos anteriores (Figura 3), constata-se uma grande dispersão, especialmente na passagem de 2006 para 2009. Por um lado, se a expansão do NMP a partir da Península de Setúbal para sul, ao longo do Litoral Alentejano, e para nordeste, ao longo do Vale do Tejo, pode ser considerado “natural”, assente na contiguidade do território, o mesmo já não se pode dizer das áreas afetadas de 2006 a 2009, as quais se encontram bastante dispersas, em concelhos descontínuos e frequentemente separados por barreiras físicas naturais importantes. O aparecimento do NMP em concelhos tão afastados do foco inicial de contágio, sem contacto com outros concelhos já afetados (veja, por exemplo, o caso de Boticas), constituem focos secundários que apenas se explicam com base nas atividades humanas, nomeadamente através do transporte de madeira infetada para essas áreas.

O período de 2009 a 2011, embora seja também de expansão do NMP, parece corresponder a um abrandamento da dispersão verificada anteriormente, pois os novos contágios fazem-se, em todos os casos, de forma contígua aos concelhos já infetados onde existem grandes manchas de coníferas.

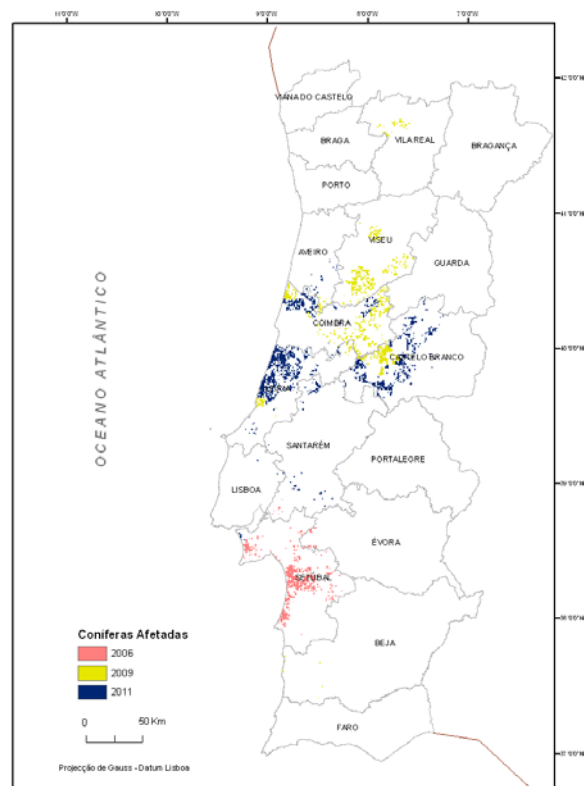


Figura 3 – Áreas potenciais afetadas pelo NMP em Portugal Continental (2006, 2009 e 2011).

1.5. O inseto vetor *Monochamus* e a transmissão do *Bursaphelenchus xylophilus*

Tal como já foi referido, o NMP necessita de um vetor para se propagar. Nos países onde o *Bursaphelenchus xylophilus* ocorre, a espécie *galloprovincialis* do género *Monochamus* assume o papel mais importante como vetor (Tomiczek, *et al.*, 2008). Estudos elaborados no relatório da PHRAME (2007), indica que um único inseto pode ser o vetor de várias espécies de *Bursaphelenchus* e que cada uma destas pode ter diferentes vetores; contudo, em Portugal, o *Bursaphelenchus xylophilus* apenas foi detetado no vetor *M. galloprovincialis*, e não foi detetado em qualquer outra espécie do género *Bursaphelenchus*. Sendo o *Monochamus galloprovincialis* responsável pela distribuição do NMP em Portugal, foram realizados, também neste território, estudos sobre a biologia desta espécie (Naves *et al.*, 2008), os quais incidem sobre o número anual de gerações, o desenvolvimento sazonal, o padrão de emergência de adultos e a sua variação anual, entre outros.

O transporte do *Bursaphelenchus xylophilus* por parte do inseto vetor ocorre através dos élitros e da traqueia (Mota *et al.*, 2009). A sua transmissão para o hospedeiro tem duas formas: a primeira ocorre quando o inseto vetor se alimenta dos ramos das árvores sãs e o nemátodo emerge e entra na árvore pelas feridas provocadas pelo *monochamus*; a segunda ocorre aquando da fase da ovoposição feita pelas fêmeas de *monochamus* na madeira em declínio ou em decomposição (Linit, 2001). No primeiro caso, o *Bursaphelenchus xylophilus* origina a doença do pinheiro; no segundo caso o nemátodo é considerado um saprófita que se alimenta de madeira em decomposição.

Relativamente ao período de emergência e dispersão da espécie *Monochamus galloprovincialis* foram efetuados estudos por Naves *et al.* (2008) e Tomiczek *et al.* (2008). Segundo Naves *et al.* (2008), entre 2001 e 2004, em Portugal Continental, foi observado que o período de emergência da espécie vetor do NMP ocorreu entre Maio e Setembro com um pico em Julho e, segundo Tomiczek *et al.* (2008), o padrão de emergência da mesma espécie, na Áustria, foi compreendido entre os meses de Junho e Setembro. Os insetos do género *Monochamus* vivem até Outubro sendo a sua fase de maturação, até ao fim do seu ciclo de vida, baseada numa constante alimentação (Tomiczek *et al.*, 2008).

A nível de dispersão, dentro do hospedeiro, o nemátodo circula sem restrições. Todavia, é necessário, tal como referido anteriormente, um inseto vetor para este se deslocar entre hospedeiros. O inseto vetor tem a característica de voar ativamente atingindo a sua capacidade máxima de voo ao fim de 5 dias após emergir, tendo, em termos de distância, a capacidade máxima de voo de 3,3 km; todavia, na maioria dos casos, a sua dispersão não é superior a alguns metros (Kobayashi *et al.*, 1984 cit. em EPPO, 1999). Tendo por base o valor padrão da distância efetiva que o vetor do NMP consegue percorrer e observando as áreas afetadas pelo mesmo é de referir que a disseminação do nemátodo a grandes e médias distâncias, mesmo quando dentro do mesmo contexto territorial, apenas pode ser feita na dependência das atividades humanas tais como o transporte de madeira infetada.

1.6. Vetores do *Bursaphelenchus xylophilus* no Continente Europeu e em Portugal Continental

A nível mundial é estimada a existência de cerca de 150 espécies do género *Monochamus* (Sathyapala, 2004). De acordo com Hellrigl (1971, cit. em Akbulut *et al.*, 2008), no continente europeu existem cinco espécies deste género: *M. galloprovincialis*, *M. sartor*, *M. sutor*, *M. urusovi* e *M. saltuarius*. Em Portugal, de acordo estudos efetuados por Sousa *et al.* (2001, cit. em Naves *et al.*, 2008), apenas foi identificada uma espécie vetor capaz de disseminar o nemátodo, ou seja, a espécie *M. galloprovincialis*. Apesar da diversidade de espécies, estas são morfologicamente similares, diferindo na sua distribuição geográfica, hospedeiros, locais preferenciais de ovoposição, número de instares (estágio larval) e longevidade do ciclo de vida (Hellrigl, 1971; Kobayashi *et al.*, 1984; Linit, 1987; Linsley e Chemsak, 1984; Webb, 1909 cit. em Dwinell *et al.*, 2004). Devido à sua grande dispersão geográfica, os países que ainda não tiveram focos de áreas contaminadas pelo *Bursaphelenchus xylophilus* mas que têm a espécie vetor, grande variedade e densidade de hospedeiros e condições climáticas ideais de propagação (por exemplo a Turquia; Akbulut *et al.*, 2008), estão a tomar medidas preventivas, tais como o aprofundamento científico do comportamento da espécie e o embargo a madeira proveniente de países afetados pela doença, de forma a proteger a sua floresta.

Capítulo 2 – Modelos de Adequabilidade de *Habitat* e Expansão para o *Bursaphelenchus* *Xylophilus* em Portugal Continental

2.1. Introdução

O estudo do NMP tem tido em Portugal grandes desenvolvimentos, nomeadamente através do contributo de Mota (1999; 2001; 2009) para o conhecimento da sua taxonomia e biologia. Todavia, os modelos de distribuição de espécies utilizados para o estudo de outras espécies (Ribeiro *et al.*, 1988; Almeida *et al.*, 2008; Capinha, 2009) não têm sido aplicados no caso do nemátodo, exceção feita aos modelos elaborados e publicados pelo relatório PHRAME (2007), nomeadamente modelos empíricos e heurísticos do *Pinus pinaster*.

A modelação da distribuição de espécies tem sido desenvolvida sobretudo no campo da biogeografia e da biologia da conservação (Capinha, 2009). A maioria das tentativas de modelação desenvolvidas para prever a distribuição de espécies de animais ou plantas teve o seu início na quantificação das relações espécies-ambiente (Guisan e Thuiller., 2005). Estas quantificações correspondem à análise das relações entre dados de campo acerca da distribuição de espécies ou comunidades em estudo e variáveis consideradas representativas das suas exigências ecológicas. Tais quantificações baseiam-se na generalidade em duas abordagens (Guisan e Zimmerman., 2000, cit. em Capinha, 2009): o conhecimento por parte de especialistas acerca dos organismos em estudo; ou a utilização de modelos correlativos. Tanto o conhecimento de especialistas como o conhecimento correlativo são formas de integração dos dados geográficos (espaciais) em modelos preditivos de distribuição de espécies.

Com o intuito de produzir os primeiros modelos de espécies aplicados ao Nemátodo do Pinheiro foram elaborados modelos de adequabilidade climática e bioclimática bem como um modelo de avaliação de expansão devido ao facto que, ao contrário de estudos comuns de adequabilidade, o fenómeno em causa tem uma origem geográfica bem definida, a partir da qual se dá a sua propagação por Portugal Continental. Os dados utilizados para estes modelos foram baseados nas características físicas e humanas de dispersão do NMP, nomeadamente na influência das variáveis climáticas no condicionamento e expansão da espécie e na distância às estradas² como fator de propagação. A seleção das variáveis independentes a integrar o modelo foi escolhida

² Itinerários Principais e Itinerários Complementares

com base na bibliografia existente, nomeadamente na informação definida pelo relatório PRHAME (2007) e em Mota *et al.* (2008).

2.2. Modelos de distribuição de espécies

Os modelos de distribuição de espécies (MDE) são modelos empíricos que relacionam observações de campo com variáveis ambientais preditivas, baseadas em respostas estatísticas ou teóricas (Guisan e Zimmermann, 2000, cit. em Guisan e Thuiller., 2005). Estes modelos têm tido um grande enfoque em várias áreas; de acordo com Guisan e Thuiller (2005), os modelos de distribuição de espécies têm vindo a ganhar importância para a resolução de vários problemas nas áreas da ecologia, biogeografia e, mais recentemente, em biologia de conservação e alterações climáticas. Estes modelos têm o objetivo de fornecer informação preditiva detalhada da distribuição de espécies, relacionando dados de presença ou de abundância com indicadores ambientais (Elith *et al.*, 2006).

Os MDE baseiam-se no conceito de nicho (Guisan e Zimmermann., 2000 cit. em Guisan e Thuiller., 2005), ou seja, representam a quantificação das características da adaptabilidade de uma determinada espécie em sobreviver e procriar num espaço com condições idênticas às áreas de onde provém. Todavia, segundo Pearson (2007), independentemente de uma área apresentar as condições ambientais adequadas para a dispersão de uma espécie, esta pode não ocupar essa mesma área devido às barreiras geográficas que limitam a sua dispersão ou a interações bióticas com outras espécies.

A grande questão colocada aos MDE é a fiabilidade dos dados utilizados e a dinâmica associada aos modelos, ou seja, uma espécie não se cinge, apenas, a permanecer num espaço adequado mas também a ter uma tendência de expansão e dinâmica implícita. Estes dois termos (expansão e dinâmica), de acordo com Guisan e Thuiller (2005), são utilizados para explicar e prever observações de tendências biogeográficas baseadas nas recentes reconsiderações do conceito de nicho.

A concetualização de um modelo de distribuição de espécies é produzida através da integração de dados representados espacialmente com três tipos de variáveis independentes (Guisan e Thuiller., 2005.): fatores limitativos; fatores ambientais e

recursos. Tendo em conta a tipologia das variáveis apresentadas no presente estudo, as variáveis independentes utilizadas são de descrição ambiental ou dependem destas para assumirem a sua relação com a distribuição geográfica da espécie, como, por exemplo a Densidade de Coníferas. A variável “Distância às Estradas” ao contrário das variáveis ambientais enquadra-se na tipologia de variáveis de recursos.

Na realidade, o potencial de distribuição de espécies não é antevisto, mas a utilização de um MDE pode permitir identificar áreas que podem ser ideais para a reintrodução de espécies (Pearce e Lindenmayer, 1998, cit. em Pearson, 2007) ou áreas onde uma espécie tem maior probabilidade de se tornar invasora (Peterson, 2003, cit. em Pearson, 2007). O objetivo, por assim dizer, dos resultados dos MDE reside no facto de termos um conhecimento *a posteriori* que nos vai permitir tomar medidas, quer mitigadoras (se a espécie for invasora) quer ideais (se o objetivo for conservar uma espécie).

2.2.1. Modelos mecanicistas e modelos correlativos

Os modelos mecanicistas assentam essencialmente no conhecimento de especialistas acerca da fisiologia da espécie. Estes modelos requerem informação detalhada sobre a resposta da fisiologia da espécie a fatores ambientais, sendo então difíceis de desenvolver para todas as espécies (Pearson, 2007). Para garantir a fiabilidade do modelo mecanicista o investigador necessita de ter um conhecimento aprofundado das características da espécie em relação a determinados conjuntos de variáveis ambientais. Assim, para criar um modelo de adequabilidade, o investigador utiliza esse conhecimento acerca da influência que as variáveis exercem sobre a espécie em estudo, o qual se reflete na atribuição de ponderações (*scores*) que traduzem essa importância relativa. Os resultados destes modelos devem, ainda, ser confrontados com a distribuição conhecida da espécie, para que se possam aferir as ponderações previamente atribuídas.

Os modelos correlativos têm o objetivo de estimar as condições ambientais que são ideais para uma espécie através da associação de ocorrências conhecidas de indivíduos com conjuntos de variáveis ambientais que podem ser esperadas que afetem a fisiologia e probabilidade de existência de uma espécie (Pearson, 2007).

Os procedimentos para o cálculo e validação de um modelo correlativo são baseados na bibliografia de Pearson (2007), na qual este afirma que são necessários dois tipos de modelos de dados de *input*: 1) Registos da ocorrência da espécie (dados de presença apenas, presença – ausência ou abundância); 2) Um conjunto de variáveis ambientais. A partir deste conjunto de informação, os dados são manipulados num SIG e calibrados, nomeadamente através de métodos estatísticos preditivos comumente utilizados, por exemplo a regressão linear. Todavia existem diversos métodos estatísticos que podem ser utilizados para o cálculo de modelos correlativos; muitos deles são mencionados por Segurado e Araújo (2004), entre os quais se destacam: Algoritmos genéticos (GARP/AG), Modelos Lineares Generalizados (GLM), Redes Neurais Artificiais (RNA), Medidas de Distância (GOWER), Análise Fatorial do Nicho (ENFA) e Modelos Aditivos Generalizados (GAM). Estes diferentes métodos têm diferentes vantagens e fraquezas, sendo que a escolha do método apropriado dependerá dos dados, hipóteses e objetivos dos exercícios (Segurado e Araújo., 2004).

Segundo alguns autores (Leathwick *et al.*, 2001; Anderson *et al.*, 2002, cit. em Guisan e Thuiller., 2005), a inclusão de variáveis adicionais preditivas, representando dados de presença e ausência de competidores conhecidos, aumenta, significativamente, o poder preditivo dos MDE. Estes modelos podem ser avaliados de forma qualitativa e quantitativa: a primeira refere-se à avaliação do ajustamento dos resultados dos modelos aos dados de ocorrência utilizados; a segunda refere-se à avaliação dos modelos como preditores dos eventos reais (Myers, 1997 cit. em Segurado e Araújo., 2004).

A eficácia dos modelos correlativos (e os respetivos erros associados) varia consoante a informação fornecida em relação às espécies e é referente a dados apenas de presença, de presença e ausência, ou de abundância. Entre os possíveis erros que podem ocorrer nos modelos correlativos, destacam-se: a seleção e utilização de variáveis ambientais em que a adequação a uma determinada espécie pode não ter o mesmo efeito em outra; e a qualidade dos dados, ou seja, a localização imprecisa de ocorrência de espécies e erros de propagação durante a produção dos modelos em SIG (Segurado e Araújo., 2004).

2.3. Nicho ecológico das espécies pertencentes aos géneros *Monochamus* e *Bursaphelenchus*

Um dos conceitos de nicho ecológico mais referido por diversos autores é o definido por Hutchinson (1957), que consiste em um conjunto de variáveis ambientais e valores limite dentro dos quais uma espécie pode sobreviver. Segundo Vasquez (2005), Hutchinson (1957) afirma que as variáveis implícitas à definição de nicho definem uma região (hipervolume n-dimensional), em que cada ponto corresponde a um possível estado do ambiente em que a espécie pode existir indefinidamente. Os conceitos de nicho ecológico fundamental e de nicho ocupado, apesar de serem similares, não são idênticos (Pearson, 2007). Isto deve-se ao facto que o nicho ocupado representa as condições ambientais onde a espécie atualmente existe, conhecidos os efeitos da competição e outros fatores, tais como a história biogeográfica da espécie (Mackey *et al.*, 2000).

Tendo por base estes fundamentos teóricos (nicho ocupado e nicho fundamental) é possível compreender a distribuição de uma espécie tanto no espaço geográfico como no espaço ambiental, ajudando-nos a definir alguns conceitos básicos que são cruciais para a modelação da distribuição de espécies (Pearson, 2007).

A existência das espécies do género *Bursaphelenchus* está diretamente relacionada com as áreas ou nichos de ocupação do inseto vetor bem como a existência de hospedeiros, sendo que tanto uns como outros variam consoante a região ou nicho que ocupam. No caso particular do género *Bursaphelenchus*, 25 das suas espécies foram identificadas nas coníferas da Europa, nomeadamente na Alemanha, Escandinávia, França, Polónia, Áustria, Bulgária, Chipre e Rússia (Braasch *et al.*, 1998, cit. em Mota *et al.*, 1999). Por sua vez as espécies do género *Monochamus* têm uma distribuição geográfica que varia em função dos diferentes tipos de espécie; Hellrigl (1971, cit. em Rutherford *et al.*, 1987) registou a seguinte distribuição:

- o *Monochamus sartor* na Europa Central, Alpes e Polónia;
- o *Monochamus urossovi* na Europa do leste, Finlândia, Rússia, norte da Ásia, Coreia e Japão;

- o *Monochamus sutor* nos Pirenéus, Escandinávia, Finlândia, na faixa compreendida entre a Rússia e a costa este e no Japão;
- o *Monochamus galloprovincialis* no norte de África e Europa (exceto Escandinávia).

Estudos mais recentes elaborados por Skarmoutsos e Michalopoulos para a EPPO (1999, cit. em Sathyapala, 2004) permitiram a identificação de mais uma espécie na Europa - *Monochamus saltuarius* -, que se encontra presente na Europa Central e de Leste, no sul da Itália e na Lituânia.

2.4. Seleção de Variáveis Independentes a incluir no modelo

A obtenção de variáveis espaciais com maior potencial preditivo baseadas no conhecimento dos fatores que interferem na distribuição das espécies em questão é tida como um dos grandes passos a dar na modelação de habitats potenciais (Araújo *et al.*, 2006, Tsoar *et al.*, 2007, cit. em Capinha, 2009). A grande complexidade do nemátodo, inseto vetor e a sua relação com os diferentes tipos de hospedeiro torna a seleção das variáveis bastante difícil. Assim sendo, a escolha das variáveis baseou-se em estudos já efetuados reduzindo a margem de incerteza sobre os efeitos reais na propagação/condicionamento da espécie. Todavia é importante referir que as variáveis ambientais, utilizadas nos modelos de distribuição de espécies, são improváveis de abranger todas as possíveis dimensões de espaço ambiental, devido ao facto que representam apenas um conjunto de possíveis fatores ambientais que influenciam a distribuição das espécies sendo, por isso, necessária a integração, quer de variáveis físicas quer de variáveis biológicas, para definir o nicho fundamental (Pearson, 2007).

Na seleção e escolha de variáveis existe um conjunto de fatores a ter em conta, tais como: disponibilidade da informação, detalhe espacial a que se encontra disponível, estrutura dos dados (vetorial ou matricial), tipo de escala (nominal e ordinal, para dados categóricos, ou intervalo e razão, para dados contínuos) e representação espacial dos dados (discreta ou contínua).

Após a conjugação do conhecimento acerca da ecologia da espécie com os dados disponíveis, foram selecionadas 5 variáveis para integração com base em modelos mecanicistas e correlativos do nemátodo da madeira do pinheiro: temperatura máxima

média do trimestre mais quente (°), temperatura mínima média do trimestre mais frio (°), densidade de áreas florestais de coníferas, precipitação anual (mm) e distância às estradas (km).

2.4.1. Aquisição de Informação

Atualmente a aquisição de informação mantém-se como o maior aspeto de consumo de tempo e o fator que mais contribui para o investimento financeiro. Tipicamente, esta etapa consome entre 15 a 50% do tempo de um projeto SIG (Longley *et al.*, 2004).

A informação tida como necessária para a produção dos modelos de adequabilidade consiste na utilização de dados climáticos. Para Portugal, a obtenção deste tipo de dados de forma gratuita não é fácil; como forma de suplantar esse entrave os dados foram obtidos através do projeto *WorldClim*. Este projeto consiste num conjunto de variáveis climáticas elaboradas através da interpolação de dados climáticos compreendidos entre o período 1950 – 2000, com uma resolução espacial de 30 arcos por segundo, ou seja, com resolução de cerca de 1 km (Hijmans *et al.*, 2005). Estas variáveis climáticas derivam de dados climáticos, conhecidos por serem importantes para o estudo ecológico (PHRAME, 2007) e têm sido utilizados em vários projetos de modelação biogeográfica (Giriraj *et al.*, 2008, cit. em Capinha, 2009). Em termos de incoerências nos modelos produzidos pelos dados do projeto *WorldClim*, destacam-se as áreas com menor densidade de estações climáticas e as áreas onde existe maior variação de altitude. A nível da consistência da informação disponibilizada, estes modelos, aquando a sua produção, constituíam-se como os que incorporavam a maior quantidade de informação de base proveniente de estações climatológicas (Hijmans *et al.*, 2005).

Os dados geográficos utilizados nesta dissertação foram provenientes de diversas fontes (Quadro II) e diferentes categorias temáticas. No caso dos dados provenientes da Corine Land Cover (CLC) e da Carta Administrativa Oficial de Portugal (CAOP) ambos provêm da mesma instituição (IGP) tendo, no entanto, finalidades temáticas diferentes. No caso dos dados climáticos provenientes do projeto *WorldClim* estes diferem no sistema de coordenadas utilizado pela demais informação geográfica. Com o intuito de compatibilizar as coordenadas de toda a informação geográfica foi necessário proceder à transformação do sistema de referenciação dos dados utilizados para o sistema Lisboa

Hayford Gauss IGEOE através de um processo de reamostragem com base no método da máxima vizinhança (*Resample - Nearest Neighbour*, do *software* SIG - Integrated Land and Water Information System - ILWIS). Para proceder aos cálculos dos modelos utilizados nesta dissertação, foi necessário converter os ficheiros de estrutura vetorial para matricial com uma resolução de 1000 m, ou seja, em que cada célula representa uma área de 1 km².

Quadro II – Síntese de Informação Geográfica

Nome	Fonte	Resolução, escala e UMC	Estrutura e formato	Sistema de Coordenadas	Variáveis espaciais obtidas
Corine Land Cover 2006 (CLC)	IGP	1/100000 UMC de 25ha	Vetorial (<i>Shapefile</i>)	ETRS89/PT-TM06	Presença/ ausência de coníferas
Carta Administrativa Oficial de Portugal (CAOP) 2009	IGP	Escala de referência 1/25000	Vetorial (<i>Shapefile</i>)	ETRS89/PT-TM06	Concelhos e freguesias
WORLDCLIM	Robert J. Hijmans, Susan Cameron, Juan Parra.	1 km ²	Matricial (<i>Grid</i>)	WGS84	Temperatura média trimestral Precipitação anual média
Digital Chart of the World 1992	ESRI	1:1.000.000	Vetorial (<i>Shapefile</i>)	WGS84	Rede viária (distância)

UMC: unidade mínima cartográfica

2.5. Descrição das variáveis utilizadas para o modelo de adequabilidade

2.5.1. Densidade de áreas florestais de coníferas

As coníferas, nomeadamente a espécie *Pinus Pinaster*, constituem o hospedeiro do nemátodo, pelo que a distribuição deste está intrinsecamente ligada a existência daquelas árvores. No caso desta variável é assumido que quanto maior a densidade de coníferas maior será a probabilidade da adequação ao NMP. O grande número de amostras infetadas com o *Bursaphelunchus*, no Centro de Portugal, reflete a grande densidade de florestas de resinosas nessas áreas (PHRAME, 2007). Esta variável foi obtida através dos dados provenientes da *Corine Land Cover* 2006, sendo a classe com a nomenclatura “Florestas de Resinosas” individualizada das restantes num único mapa (Figura 4 A). A sua densidade foi calculada através do algoritmo de densidade de Kernel com um raio de 15 km. A densidade de Kernel calcula um valor por unidade de área a partir das características da informação em pontos ou polígonos usando a função de kernel para ajustar uma superfície cónica para cada ponto ou polígono. A representação cartográfica deste modelo é visível na Figura 4 B, em que os valores representam a fração duma área com um raio de 15 km ocupada por coníferas: por exemplo, o valor máximo de densidade (1) indica uma ocupação total dessa área; um valor de 0,83 corresponde a 83% dessa área ocupada por coníferas.

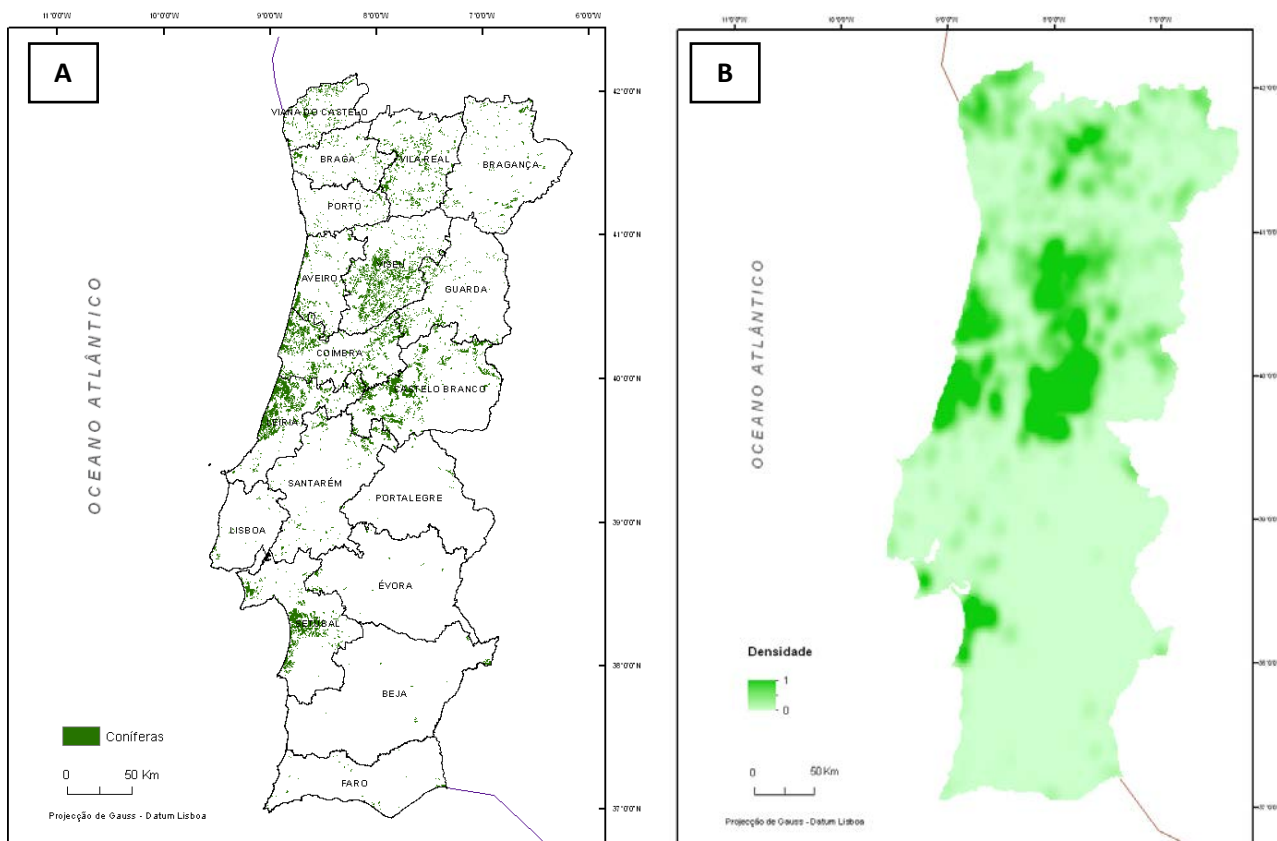


Figura 4 – Floresta de Coníferas em Portugal Continental: (A) Distribuição espacial (CLC 2006); (B) Densidade de Kernel para um raio de 15 km.

2.5.2. Temperaturas extremas médias

A temperatura tem um grande efeito na dinâmica da população de *B. xylophilus*, aquando a sua presença nas coníferas que lhe servem de hospedeiro (Daub, 2008) bem como uma forte correlação com o seu ciclo de vida (Griffin, 1988, cit. em Daub, 2008).

A variável temperatura tem um papel decisivo na sobrevivência, crescimento, distribuição e diversidade de organismos. Praticamente a totalidade dos insetos, pragas e fungos que habitam zonas de florestas são organismos mesófilos que se desenvolvem sob condições térmicas médias (5° a 37°C). A maioria dos membros deste grupo biológico tem um ótimo na região compreendida entre o 20° e os 30°C, e um limiar máximo de sobrevivência que ronda, normalmente, 46°C (Dwinell, 2001). Estes valores de temperatura, que afetam o desenvolvimento da espécie, variam entre hospedeiros, fato comprovado no estudo elaborado pela PHRAME (2007) em que a espécie

hospedeira *L. decidua* desenvolveu sintomas de infeção mais rapidamente com temperaturas de 25°C e 20°C do que as espécies do género *Pinus* à mesma temperatura.

Em relação ao *B. xylophilus*, o seu potencial de desenvolvimento é bastante elevado quando as temperaturas médias no verão são superiores a 25°C e mais baixo quando as temperaturas estão aquém de 18°C (Braasch *et al.*, 2004, cit. em Lawson *et al.*, 2008).

A opção de utilização destas duas variáveis, em simultâneo, para representar um único fator ecológico prende-se com a melhor representação dos seus contrastes espaço-temporais, algo que não seria possível de obter com a utilização de um modelo anual médio (Capinha, 2009).

A informação geográfica em estrutura matricial utilizada derivou do projeto *WorldClim*, mencionado anteriormente, para o período 1950 – 2000. A representação cartográfica destes modelos é visível na Figura 5.

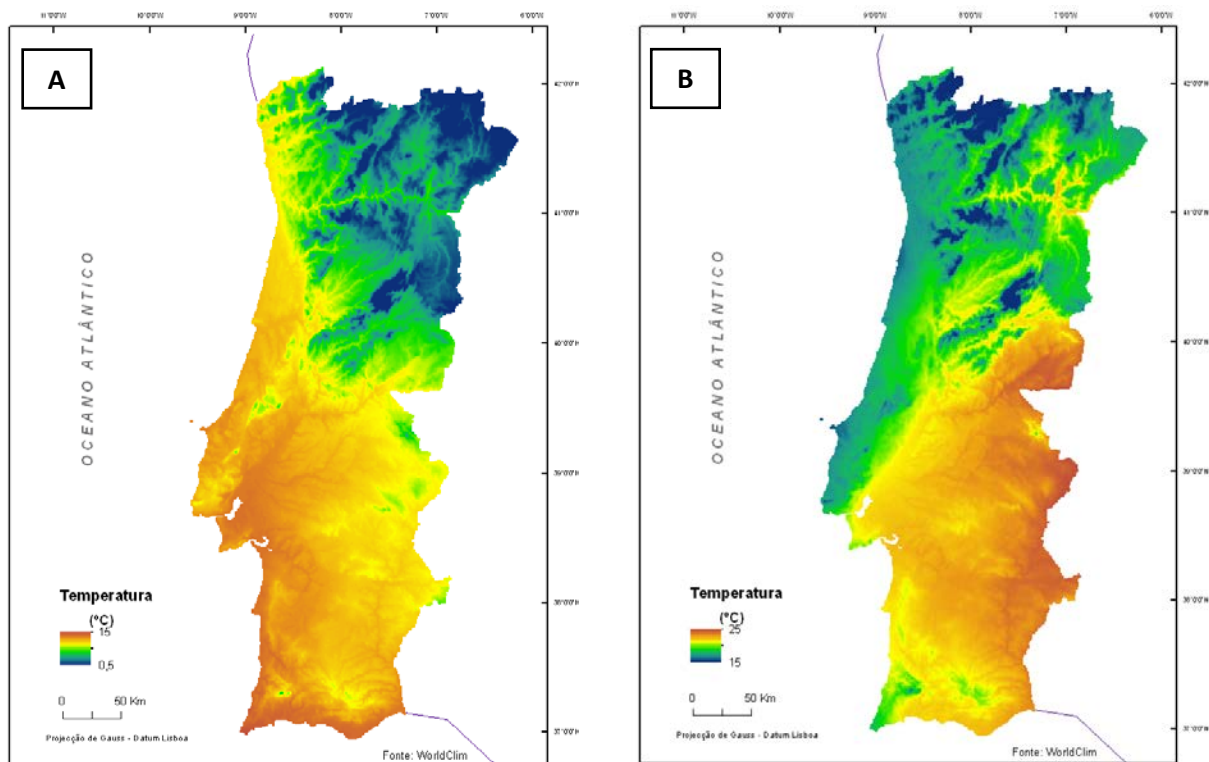


Figura 5 – Temperatura média em Portugal Continental, do trimestre mais frio (A) e do trimestre mais quente (B), para o período 1950-2000 (Fonte: Projeto WorldClim).

2.5.3. Precipitação anual

A precipitação é um dos fatores, a par da temperatura, que tem um maior potencial de impacto no desenvolvimento do nemátodo. Uma das causas que intensificou a dispersão do nemátodo do pinheiro no Japão foi a fraca precipitação (Mamiya, 1984, cit. em Dwinell, 2001). De acordo com Braasch *et al.* (2004, cit. em Lawson *et al.*, 2008) o desenvolvimento do nemátodo é previsto que seja bastante elevado com valores de precipitação anual inferiores a 600 mm e mais condicionado com valores de precipitação superiores a esse valor.

A informação desta variável foi elaborada, à semelhança da variável anterior, através da informação espacial contínua proveniente do projeto *Worldclim*, para o período de 1950 – 2000. A representação cartográfica deste modelo é visível na Figura 6.

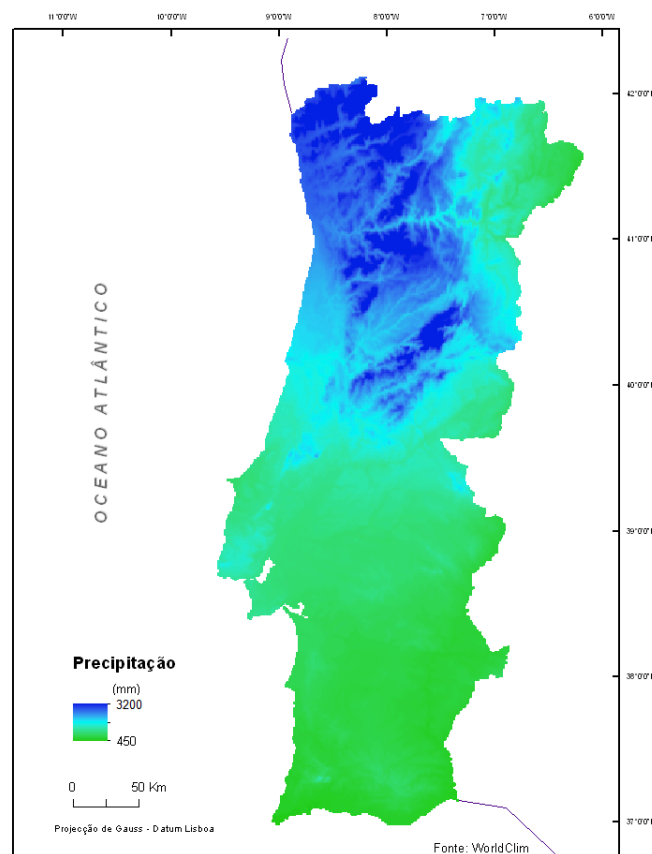


Figura 6 – Precipitação anual média em Portugal Continental para o período 1950-2000 (Fonte: Projeto WorldClim).

2.5.4. Distância às Estradas

As vias rodoviárias têm particular impacto na expansão de espécies invasoras por diversas áreas do país. Estudos elaborados por Prasad *et al.* (2009) e pela *United States Department of Agriculture Animal and Plant Health Inspection Service* (2010), demonstraram como áreas afastadas das zonas afetadas podem ser propícias a novos focos de contágio derivado das redes de estradas. O transporte de madeira infetada aumenta as possibilidades de contágio em áreas afastadas dos pontos iniciais de contágio.

Com esse intuito a variável “Distância às Estradas” foi utilizada nesta dissertação. A informação geográfica utilizada, em estrutura vetorial, posteriormente convertida para matricial, derivou do projeto *Digital Chart of the World*, mencionado anteriormente. A representação cartográfica deste modelo é visível na figura 7.

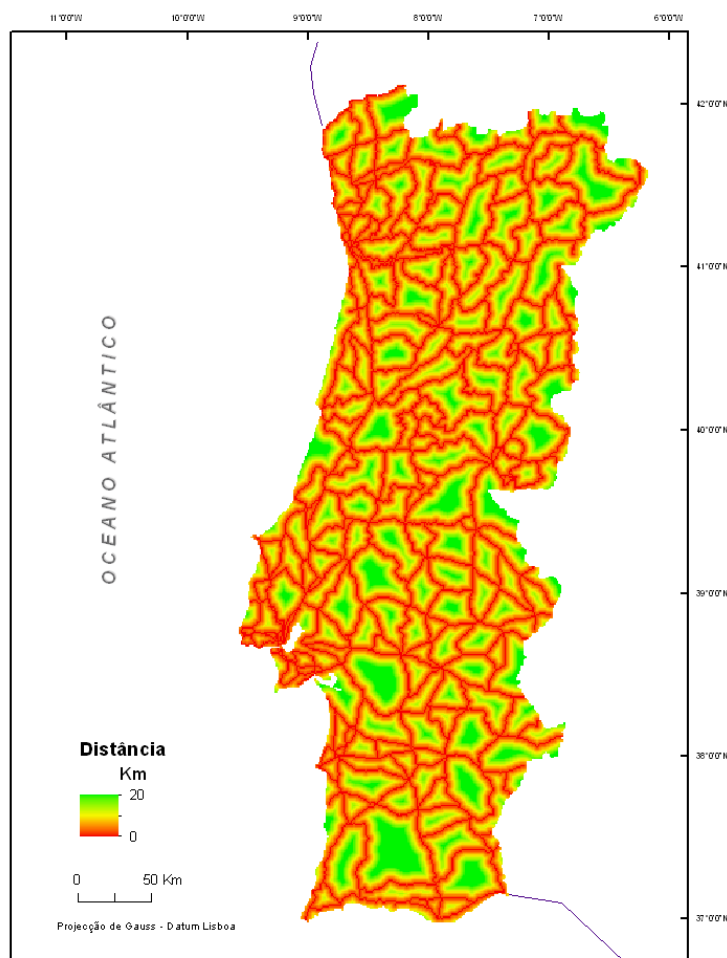


Figura 7 – Distância às Estradas.

2.6. Elaboração e validação dos Modelos Mecanicistas e Correlativos

2.6.1 Adequabilidade Climática e Adequabilidade Bioclimática

O cálculo da Adequabilidade Climática está relacionado com a adaptabilidade da espécie aos fatores climáticos, isto é, a capacidade de determinar nichos de ocupação (por isso, pode também ser chamada de adequabilidade potencial). Partindo do pressuposto que todo o território pode ser ocupado por coníferas (espécie hospedeira) em iguais condições, foi determinada a adequabilidade da espécie baseando-se apenas em fatores climáticos - temperatura e precipitação -, tendo por base os valores médios das variáveis precipitação anual, temperatura do trimestre mais frio e temperatura do trimestre mais quente. Para calcular a Adequabilidade Climática classificou-se previamente as variáveis espaciais, tendo-se procedido, posteriormente, à atribuição de ponderações a essas classes com base numa gama de valores de 0 (adequabilidade nula) a 1 (adequabilidade máxima).

Para a classificação prévia das variáveis espaciais utilizadas para o cálculo da adequabilidade climática houve a necessidade de definir 5 classes para cada variável, através do método de intervalos iguais; este processo consiste no cálculo da diferença entre o maior valor e o menor valor presente na variável, sendo, posteriormente, dividido pelo número de classes escolhido. Após esta divisão as diferentes classes das variáveis são ponderadas com um valor entre 0 e 1 (Quadro III); estas ponderações foram obtidas para cada uma das variáveis através de um valor padrão, ou seja, correspondem aos valores, acima dos quais (2 primeiras variáveis) e abaixo do qual (precipitação) se atribuem os máximos de ponderação (adequabilidade). Os valores padrão utilizados para as variáveis foram os seguintes:

Temperatura do Trimestre mais Frio – 18°C;

Temperatura do Trimestre mais Quente – 25°C;

Precipitação – 600mm.

Para definir o valor de ponderação de cada classe é feita a divisão do limite máximo da classe pelo valor respetivo da variável. Estes valores correspondem aos ótimos de

desenvolvimento da espécie mencionados anteriormente aquando da explicação de cada variável.

Quadro III – Valores de ponderação atribuídos às classes das variáveis condicionantes.

Precipitação		Temperatura Trimestre mais Frio	
Classe (mm)	Ponderação	Classe (°C)	Ponderação
462 – 727	0,83	0,38 – 2,9	0,16
727– 992	0,60	2,9 – 5,4	0,30
992- 1256	0,48	5,4 – 7,9	0,44
1256 - 1521	0,39	7,9 – 10,5	0,58
1521 – 1787	0,34	10,5 – 13	0,72
Temperatura Trimestre mais Quente			
Classe (°C)	Ponderação		
13,5 – 15,8	0,63		
15,8 – 18	0,72		
18 – 20,3	0,81		
20,3 – 22,5	0,90		
22,5 – 24,7	0,98		

Após a definição, através da bibliografia consultada (PHRAME, 2007), da variável climática com maior capacidade preditiva, temperatura, os valores da Adequabilidade Climática (*AdqClima*) foram obtidos através da combinação linear ponderada entre as três variáveis previamente escalonadas (Figura 8A) em que a ponderação atribuída foi a seguinte: 0,4 para Trimestre mais frio (*TF*); 0,4 para Trimestre mais quente (*TQ*); 0,2 para Precipitação anual média (*PAM*), ou seja:

$$AdqClima = 0,4 \times TF + 0,4 \times TQ + 0,2 \times PAM.$$

Posteriormente, os valores de adequabilidade foram agrupados em 5 classes através do método “intervalos iguais” (Figura 8B), de forma a determinar a percentagem de ocupação de cada uma das classes das áreas de adequabilidade potencial.

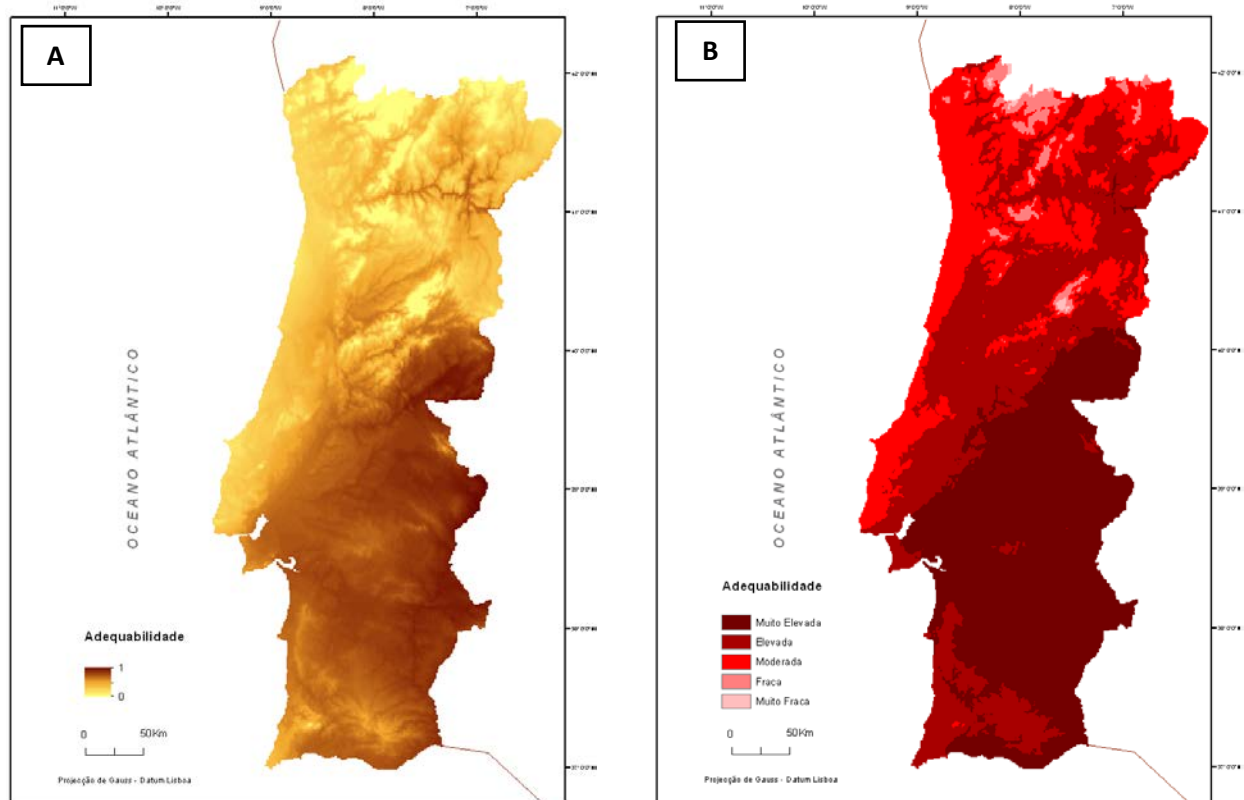


Figura 8 – Adequabilidade Climática à presença do NMP: em valores contínuos (A) e classificada (B).

O cálculo da Adequabilidade Bioclimática (*AdqBIOClima*) consiste na obtenção de uma superfície com valores de adequabilidade nas áreas onde a espécie hospedeira do nemátodo do pinheiro está presente, em ponderação com a adequabilidade climática³. Esta adequabilidade será utilizada para obter a expansão do nemátodo do pinheiro a partir do foco de contágio, quer isoladamente quer, mais adiante, conjugada com a variável “Distância às Estradas”. O cálculo do modelo incidu numa combinação linear ponderada entre a Adequabilidade Climática e a densidade de coníferas escalonada entre 0 e 1 (Quadro IV), sendo que o valor de 0 indica as áreas de ausência de coníferas e o valor 1 as áreas com maiores valores de presença de coníferas. Os valores de

³ Uma alternativa intermédia, também interessante, seria a integração da adequabilidade climática com a distribuição natural potencial da espécie hospedeira (*Pinus pinaster*), resultando num mapa de adequabilidade bioclimática potencial; todavia, considerou-se que a elaboração deste mapa de distribuição potencial do *P. pinaster* saíria do âmbito deste trabalho.

ponderação atribuídos às duas variáveis foram bastante diferentes, sendo maior na variável “Densidade de Coníferas” (*DensConif*) (0,6) e muito menor na Adequabilidade Climática (*AdqClima*) (0,4), ou seja:

$$AdqBIOclima = 0,4 \times AdqClima + 0,6 \times DensConif.$$

Estes valores foram o resultado de um processo prévio de tentativa e erro em que foram combinadas diversas ponderações de forma a obter o melhor resultado através do cálculo da percentagem de área potencialmente afetada dentro das classes com maior adequabilidade. Ao atribuir um valor de ponderação climática acima de 0 às áreas onde o hospedeiro não está presente, estende-se a adequabilidade a todo o território (Figura 9A); todavia, o resultado final indica, essencialmente, a variação de adequabilidade nas áreas onde existe o hospedeiro do Nemátodo do Pinheiro. Posteriormente, os valores da adequabilidade bioclimática são divididos em 5 classes através do método “intervalos iguais” (Figura 9B), de forma a determinar a percentagem de ocupação de cada uma das classes potencialmente afetadas.

Quadro IV – Valores de ponderação atribuídos às classes da variável Densidade de Coníferas.

Densidade de Coníferas	
Classe	Ponderação
0 – 2471	0,17
2471 - 4943	0,33
4943 – 7414	0,50
7414 - 9885	0,66
9885 – 12357	0,82

No caso da adequabilidade climática, as classes mais elevadas (Elevada e Muito Elevada) ocupam mais de 70% do território nacional (Quadro V). Estes resultados demonstram uma elevada aptidão climática do País para a presença do NMP, ou seja, refletem as características ideais à presença do NMP caso a sua dispersão fosse influenciada apenas pelas variáveis climáticas. A distribuição espacial da adequabilidade é a esperada, tendo em conta as variáveis utilizadas e as ponderações

atribuídas, ou seja, valores máximos em grande parte do Sul de Portugal e no vale do Douro, onde as temperaturas são mais elevadas e as precipitações menos abundantes, e valores mínimos em áreas restritas confinadas às altitudes mais elevadas do Centro (Serra da Estrela) e Norte de Portugal.

Por outro lado, no que diz respeito à coincidência com as áreas afetadas pelo nemátodo do pinheiro (ano de 2006, 2009 e 2011), os valores de percentagem mostram uma distribuição similar das classes de adequabilidade “Moderada” e “Muito Elevada”, mas valores muito mais elevados na classe de adequabilidade “Elevada”. No entanto, só por si, este indicador apresenta uma eficácia pequena na explicação das áreas afetadas, visto que, quando se consideram, em conjunto, as duas classes de maior adequabilidade, apesar de ocuparem 73% do território continental português, não contemplam mais de 80% das áreas afetadas. Estes resultados são, também, os esperados pois, em grande parte, a distribuição espacial das áreas de coníferas no nosso País não coincide com as áreas de máxima adequabilidade climática anteriormente identificadas. A exceção corresponde a uma parte da Península de Setúbal e do Litoral Norte Alentejano, que conjugam boas condições climáticas para o desenvolvimento do NMP e presença relativamente abundante de coníferas, cujas áreas, aliás, já se encontram em grande parte afetadas (a que não será indiferente, também, a grande proximidade ao foco de contágio).

Quadro V – Percentagem de área afetada em cada uma das classes de adequabilidade para o modelo de Adequabilidade Climática.

Classes	Classes de Adequabilidade	% de ocupação das áreas afetadas	% de Área do Território Nacional
0 – 0,20	Muito Fraca	0	1
0,20 – 0,40	Fraca	0,7	2
0,40 – 0,60	Moderada	21,1	24
0,60 – 0,80	Elevada	58,1	33
0,80 – 1	Muito Elevada	20,2	40

As classes de Adequabilidade Bioclimática ocupam valores de distribuição bastante diferentes em Portugal Continental (Quadro VI). Na classe de “Fraca” adequabilidade encontra-se 76% do território. Em todo o caso, como seria de esperar, as classes mais

elevadas de adequabilidade encontram uma maior correspondência (quando comparadas com as do modelo climático) com as áreas afetadas pelo NMP: quando se considera apenas a classe mais elevada de adequabilidade (“Muito Elevada”), cobre apenas 1% do território mas engloba 7% da área afetada; quando se consideram, em conjunto, as duas classes de adequabilidade mais elevadas, os valores são, respetivamente, 4 e 31%, se incluirmos também a classe “Moderada”, verificamos que em apenas 16% do território identificamos cerca de 84% da área afetada.

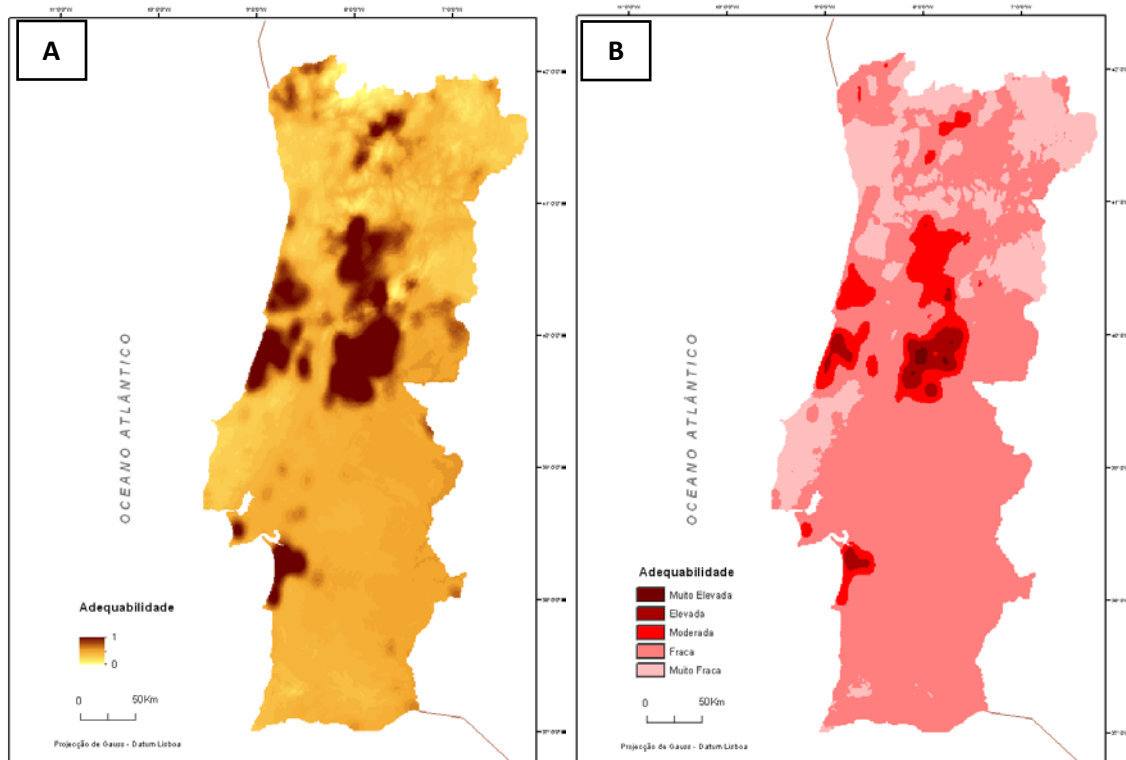


Figura 9 – Adequabilidade Bioclimática à presença do NMP: em valores contínuos (A) e classificada (B).

Quadro VI – Percentagem de área afetada em cada uma das classes de adequabilidade para o modelo de adequabilidade bioclimática.

Classes	Classes de Adequabilidade	% de ocupação das áreas afetadas	% de Área do Território Nacional
0 – 0,2	Muito Fraca	0,2	8
0,2 – 0,4	Fraca	16,2	76
0,4 – 0,6	Moderada	52,2	12
0,6 – 0,8	Elevada	24,4	3
0,8– 1	Muito Elevada	7,0	1

A análise anterior, em relação à Adequabilidade Climática e à Adequabilidade Bioclimática, em que se comparam as respetivas classes com a área afetada, embora apresente resultados com interesse, deve ser devidamente contextualizada. De facto, os valores de “taxa de sucesso” apresentados nos Quadros V e VI devem ser encarados apenas como valores aproximados (por defeito), pois assumem que o NMP já se expandiu por todo o território, sem ter em consideração o seu foco inicial de contágio. Todavia, como já foi referido, esse foco ocorreu na Península de Setúbal, pelo que os locais mais afastados terão, considerando apenas estas variáveis espaciais, menor probabilidade de serem afetados devido à distância que se encontram do foco inicial. Por isso, a ausência de áreas afetadas pelo NMP em determinadas áreas, nomeadamente do Centro e Norte do país, não refletem a existência de adequabilidades baixas, mas será apenas consequência da falta de tempo suficiente para essa expansão, da impossibilidade de ultrapassar barreiras naturais ou da ação humana preventiva. Por isso, em particular no caso da Adequabilidade Bioclimática, se fosse possível eliminar as áreas onde, até 2011, o NMP foi “impedido” de entrar, certamente seria possível obter valores mais elevados de correspondência entre as áreas afetadas e as classes de maior adequabilidade.

Esta situação justifica a utilização adicional de modelos de expansão, nomeadamente a rede viária, que consideram como factor essencial o local de contágio e utilizam variáveis espaciais de atrito à progressão do *Bursaphelenchus xylophilus*.

2.6.2 Modelação da expansão do NMP a partir do local de contágio

Nos modelos anteriores, tentou-se avaliar o grau de adequabilidade do território continental português para suportar a presença da espécie *B. xylophilus*. Estas mesmas variáveis, de forma isolada ou conjugadas com outras de natureza humana, podem ser utilizadas para avaliar a forma como esta espécie se expande a partir do local inicial de contágio. Este modelo com base na adequabilidade bioclimática, só por si, não resolve todos os problemas de representatividade da presença do nemátodo (visto que há outros fatores a considerar) mas é importante na medida que define áreas de custo de expansão do nemátodo, ou seja, com maior ou menor dificuldade à sua progressão a partir de um determinado local. A modelação das condições de expansão baseia-se no cálculo de

distâncias-custo para o território do País a partir do ponto inicial de contágio pelo NMP. O custo (superfície de atrito, de fricção ou de resistência) representa, neste caso, a dificuldade de disseminação do NMP a partir do foco de contágio. Os valores mais elevados são indicadores de uma maior dificuldade de expansão e valores mais baixos são indicadores de uma maior facilidade de expansão do NMP. Pretende-se, assim, determinar as áreas preferenciais de expansão a partir desse foco de contágio e, posteriormente, comparar os resultados com as áreas afetadas. O método de divisão em classes utilizado para os modelos de custo e o modelo de expansão foi a “divisão geométrica”. A escolha deste tipo de método relativamente ao método “Intervalos Iguais” utilizado nos modelos de adequabilidade anteriores foi devido ao fato que permite realçar as diferenças entre os valores mais baixos das variáveis garantindo que cada classe tem aproximadamente a mesma área que a precedente.

A modelação das condições de expansão pressupõe a identificação de um ponto inicial (Península de Setúbal), a partir do qual o nemátodo iniciou a propagação pelo País, e a criação de uma superfície de atrito, a qual mede a resistência a essa expansão. Esta superfície foi criada a partir das variáveis espaciais “distância às estradas” e “adequabilidade bioclimática” (Figuras 10 A e B). As condições de expansão foram obtidas através da Combinação Linear Ponderada entre as 2 variáveis espaciais mencionadas anteriormente, com uma ponderação de 0,8 atribuída à Adequabilidade Bioclimática e de 0,2 atribuída à Distância às Estradas. Estas ponderações, à semelhança da informação cartográfica anterior, resultam de um processo contínuo de teste e avaliação do resultado final, tendo sido efetuadas diversas combinações por forma a determinar qual o melhor resultado (Figura 11).

$$\text{Modelo Expansão} = 0,8 \times \text{AdqBIOClima} + 0,2 \times \text{DistEstradas}$$

O resultado obtido indica, através de um valor unitário, as áreas para a qual o NMP tem maior ou menor facilidade de expansão a partir do foco de contágio, em que o menor valor significa maior facilidade de expansão e o maior valor significa uma menor facilidade de expansão, face ao custo de cada uma das variáveis utilizadas como superfícies de atrito.

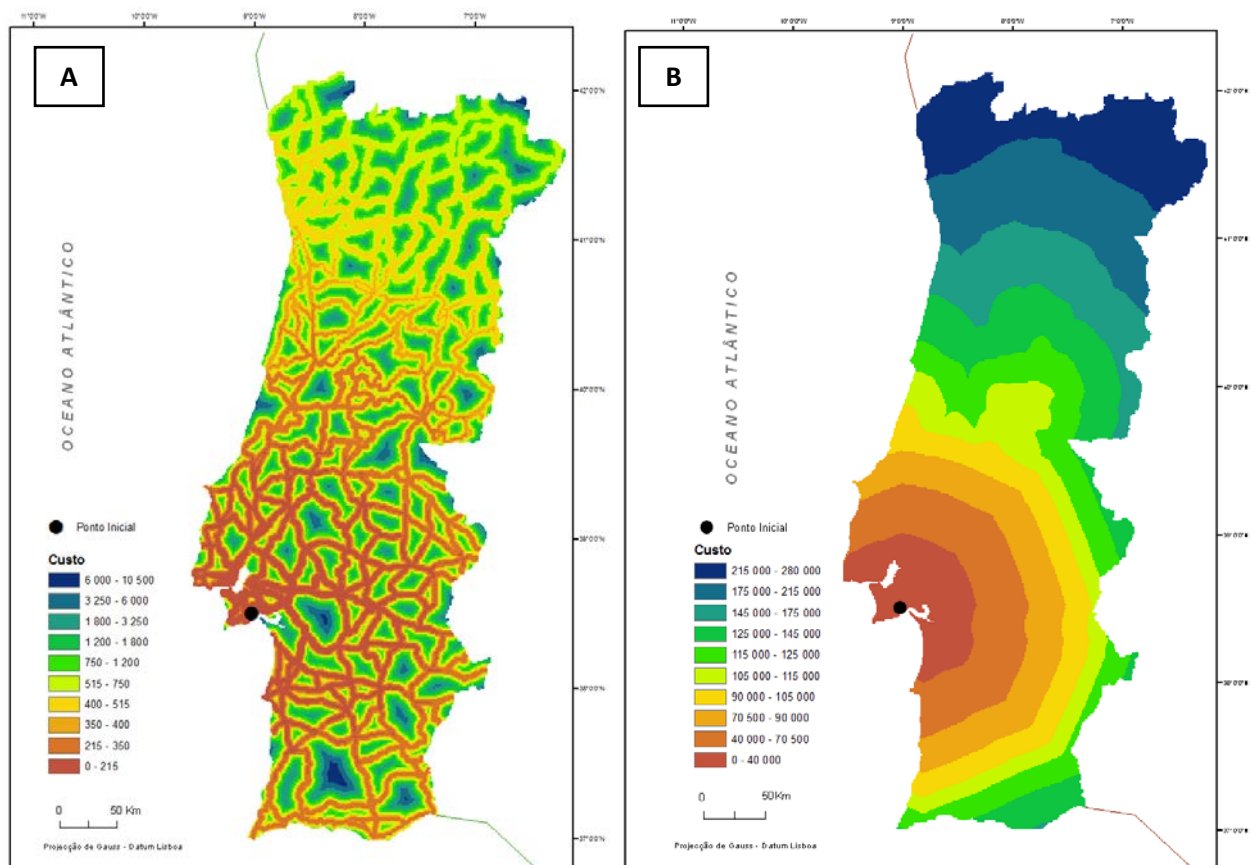


Figura 10 - Superfície de distância-custo a partir do local de contágio, com base na variável Distância às Estradas (A) e no Modelo de Adequabilidade Bioclimática (B).

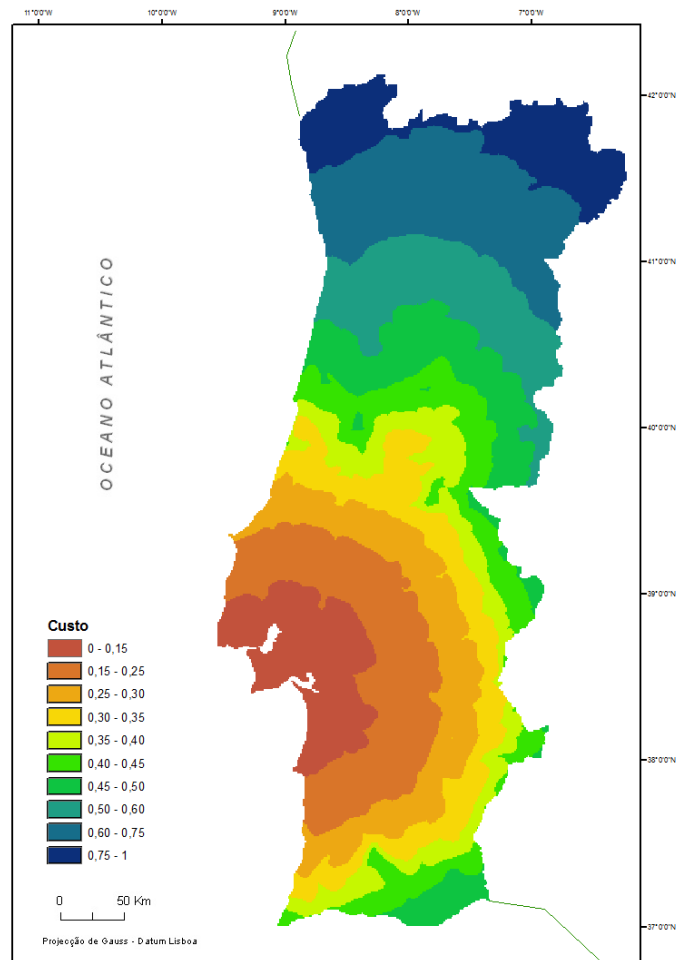


Figura 11 – Superfície de expansão do NMP a partir do foco inicial de contágio, com base na conjugação da adequabilidade bioclimática e da distância às estradas.

Numa análise aos resultados obtidos pela superfície de expansão do NMP (Figura 11) constata-se que ao aumento da distância ao foco inicial de contágio corresponde um aumento do custo (aqui interpretado como maior dificuldade em um local ser alcançado pelo NMP), como seria de esperar, mas este aumento não se faz de forma constante, observando-se uma maior facilidade de propagação em direção ao centro do território, o que coincide com a presença de maior densidade de coníferas. Os menores valores de atrito em grande parte do Alentejo e na região de Lisboa justificam-se pela menor distância ao foco de contágio inicial e pela grande adequabilidade climática dessas áreas à presença do NMP; todavia, em alguns casos, nomeadamente no interior do Alentejo, esta expansão é dificultada pela fraca densidade de coníferas. A gama de valores obtida pelo Modelo de Superfície de expansão do NMP (0 e 1) resultou da ponderação anterior das variáveis custo entre 0 e 1. Esta ponderação teve por base a necessidade da integração de variáveis ser feita com a mesma escala de valores. No caso dos modelos

de custo utilizados para o cálculo da superfície de expansão, existia uma grande desproporção na gama de valores o que iria originar uma maior ponderação inicial para a variável Superfície Custo do Modelo de Adequabilidade Bioclimática.

Validando o resultado da Figura 11 com as áreas afetadas (Quadro VII) constata-se que existe uma distribuição irregular pelas diferentes classes de custo, ou seja, enquanto na classe com menor distância-custo 19% das áreas afetadas encontram-se em apenas 8% do território nacional nas classes seguintes (0,15 – 0,25; 0,25 – 0,30), essa percentagem de área afetada diminui substancialmente ao aumento da ocupação do território nacional. A justificação para este facto é devido a essas classes de distância-custo ocuparem grande parte das NUT III Alentejo Central e Baixo Alentejo onde existe uma fraca densidade de coníferas. No oposto, as classes com uma distância-custo intermédio (0,35 – 0,40; 0,40 – 0,45; 0,45 – 0,50), em relação ao menor e ao maior valor de distância-custo, têm elevados valores de área afetada, tendo essa tendência uma diminuição com o aumento da distância-custo. Ou seja, existem dois conjuntos de classes definidas com vastas áreas de coníferas afetadas: o primeiro constitui-se pela classe de menor distância-custo e o segundo pelas classes intermédias (mencionadas anteriormente) de distância-custo não existindo um padrão regular de dispersão.

Com este modelo era expetável obter resultados de validação superiores aos do modelo bioclimático, no entanto tal facto não aconteceu já que a própria distribuição-custo tem anéis concêntricos que englobam vastas áreas com valores de distância-custo fracos mas de baixa presença da espécie hospedeira justificando as percentagens de áreas afetadas irregulares.

Quadro VII – Percentagem de área afetada (2011) em cada uma das classes do Modelo de Superfície de Expansão.

Classes de distância-custo	% de ocupação das áreas afetadas	% de Área do Território Nacional
0 – 0,15	19	8
0,15 – 0,25	1,4	13
0,25 – 0,30	1	8
0,30 – 0,35	12	11
0,35 – 0,40	27	14
0,40 – 0,45	15	9
0,45 – 0,50	20	7
0,50 – 0,60	3	9
0,60 – 0,75	1	13
0,75 – 1	0	7

2.6.3. Modelo Correlativo da Máxima Entropia

O algoritmo de Máxima Entropia baseia-se no princípio da máxima entropia, ou seja, a melhor aproximação para uma distribuição de probabilidades desconhecida é aquela que satisfaz qualquer restrição à distribuição (Phillips *et al.*, 2004).

O cálculo da máxima entropia foi efetuado através do *software* Maxent. Este cálculo consiste na estimação de determinada probabilidade de distribuição de uma espécie sabendo a probabilidade de distribuição da máxima entropia (que é a distribuição mais próxima da distribuição uniforme) submetida a um conjunto de restrições que representam a informação incompleta sobre a distribuição-alvo (Phillips *et al.*, 2006).

A escolha deste algoritmo para o estudo do NMP deveu-se a dois motivos: aos resultados obtidos por Wang *et al.* (2007; cit. em Elith *et al.*, 2011) no estudo da mesma espécie; e devido ao facto que é um dos algoritmos mais populares mencionados por numerosos autores devido ao seu desempenho e exactidão no estudo da modelação de espécies (Elith *et al.*, 2006; Hijmans *et al.*, 2006; Ward, 2007; Echarri *et al.*, 2009; Rubio *et al.*, 2010, cit. em Rubio *et al.*, 2011).

Os modelos de dados, tal como foi dito no ponto 2.2.1 podem ser de três tipos: dados de presença apenas, presença – ausência ou abundância. Na modelação da distribuição de uma espécie, a utilização conjunta de dados de presença e dados de ausência possibilita a aplicação de uma grande variedade de métodos estatísticos; todavia, os dados de ausência não existem para a maioria das espécies (Phillips, *et al.*, 2008), o que reduz a possibilidade de utilização de um maior número de métodos estatísticos. No entanto, a utilização de dados de presença apenas, em alguns casos e de acordo alguns autores (Jimenez-Valverde *et al.*, 2008, cit. em Elith *et al.*, 2011), diminuem as probabilidades de resultados erróneos derivados da utilização de dados de ausência, devido ao facto que estes enfatizam uma redução nas interações bióticas e restrições na distribuição da espécie, o que impede a modelação de distribuições potenciais (Svenning *et al.*, 2004, cit. em Elith *et al.*, 2011).

O *software* Maxent utiliza apenas dados de presença das espécies. Estes dados foram obtidos através da conversão da informação matricial, das áreas afetadas (2011)⁴, para informação vetorial pontual. Após esta conversão foram selecionados de forma aleatória 10% dos pontos nas áreas afetadas através do *software* ILWIS (Figura 12). A informação foi posteriormente importada para o *software* Maxent em conjunto com as variáveis climáticas, densidade de coníferas e distância às estradas.

⁴ Na verdade, de acordo com a metodologia utilizada para a identificação das áreas de coníferas nos concelhos afetados (ver 1.4), algumas destas células e os respetivos pontos gerados podem corresponder a situações potenciais de contágio e não a núcleos de pinheiros efetivamente contagiados.

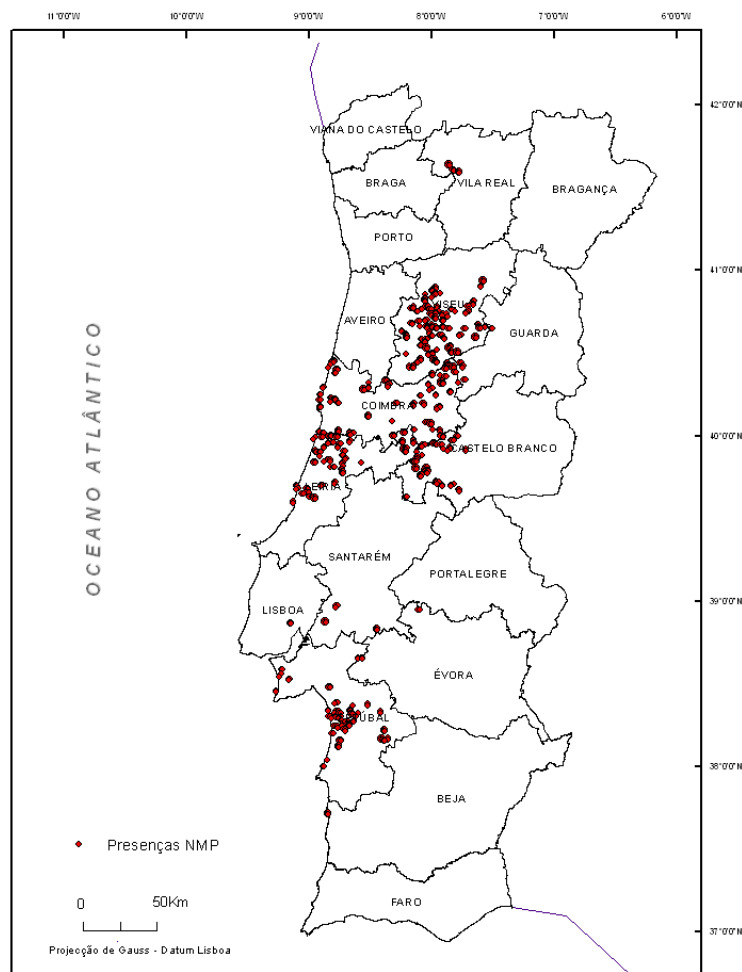


Figura 12 – Distribuição espacial de uma amostra aleatória de 10% dos dados de presença do NMP.

Uma das vantagens do *software* Maxent é a quantidade de informação estatística gerada, bem como a sua explicação, associada aos resultados finais. Entre esta panóplia de informação fornecida, o gráfico da Área Abaixo da Curva de ROC (AAC) é bastante importante para definir a potencialidade do modelo. Esta AAC calcula a qualidade do *ranking* da localização dos dados (Fielding *et al.*, 1997, cit. em Phillips *et al.*, 2008). A AAC é a probabilidade que um lugar de um dado de presença, escolhido aleatoriamente, seja classificado acima de um lugar de ausência escolhido também aleatoriamente. Um lugar aleatório tem uma média de AAC de 0,5 e um lugar perfeito tem um valor de AAC de 1,0; todavia segundo Elith (2002; cit. em Phillips *et al.*, 2008) os modelos com valores acima de 0,75 são considerados modelos potenciais. O modelo aqui obtido teve um valor de AAC de 0,939 (Figura 13) muito acima do valor definido por Elith (2002) como sendo um valor para um modelo potencial. A curva dos “dados de treino” mostra o grau de ajustamento do modelo aos dados de treino; quanto mais célere chegar ao valor

de 1 melhor é o modelo. A AAC é utilizada para qualquer tipo de temática, nomeadamente para avaliação da qualidade de modelos de análise de suscetibilidade a fenómenos perigosos. A sua aplicação à modelação de espécies é devido ao facto, além do mencionado anteriormente, de se adequar ao estudo de qualquer espécie.

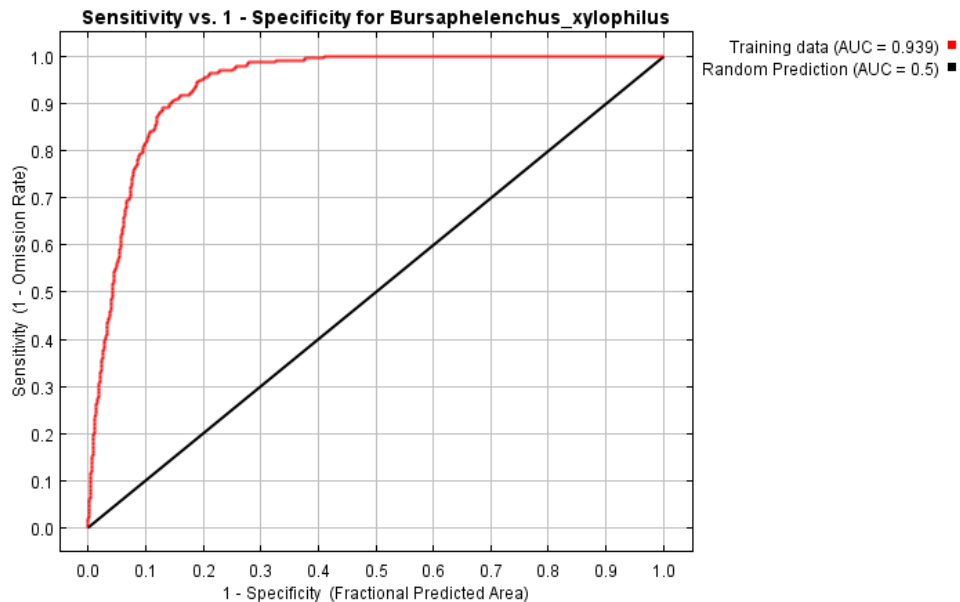


Figura 13 – Valor da Área Abaixo da Curva para a Potencialidade do Modelo.

Na medida em que o Maxent é treinado com os dados introduzidos, ou seja, 10% dos pontos das áreas afetadas, ele vai definir qual a variável que contribui mais para o modelo. Um dos resultados finais produzidos pelo *software* é um quadro que indica a percentagem de contribuição de cada variável para a presença do NMP (Quadro VIII). Numa análise a este quadro constata-se que a variável “Densidade de Coníferas tem a maior contribuição para a presença do NMP, valor que se justifica pelo facto de constituir a espécie hospedeira. Destaca-se também o valor da variável “Distância às Estradas” com uma contribuição superior na explicação do fenómeno quando comparado com as variáveis climáticas. Este valor leva a pensar que a utilização desta variável pode ser, em alguma medida, útil para perceber a dispersão do NMP.

Quadro VIII – Grau de contribuição de cada uma das variáveis para a ocorrência do NMP, obtido a partir do *software* Maxent.

Variável	Grau de contribuição relativa (%)
Densidade de Coníferas	83,4
Distância às Estradas	9,4
Temperatura do Trimestre mais Frio	2,7
Temperatura do Trimestre mais Quente	2,2
Precipitação	2,3

Através do treino dos dados introduzidos, mencionado no parágrafo anterior, o *software* Maxent fornece também um ficheiro em formato ASC que pode ser importado e manipulado num SIG. Este ficheiro, após a importação, foi classificado em função da sua adequabilidade numa gama de valores entre 0 e 1 (Figura 14A) e, também, classificado qualitativamente, ou seja, com o mesmo número de classes que os modelos de adequabilidade anteriores (Figura 14B). A sua validação foi, à semelhança dos modelos anteriores, com os dados das áreas afetadas de 2011.

Numa análise aos resultados obtidos no Quadro IX, pelo modelo correlativo da máxima entropia, constata-se que foram incremento em relação aos modelos elaborados anteriormente de cariz mecanicista. Em termos de percentagem de área afetada embutida nas classes de adequabilidade mais elevada constata-se que em apenas 9% de área do território nacional encontra-se 76% da área afetada. Pelo contrário, nas classes de adequabilidade mais fracas, encontra-se apenas 11% de área afetada em 85% do território nacional. Estes valores incorporam todas as variáveis utilizadas para esta dissertação ao contrário do modelo de Adequabilidade Bioclimático que não incorpora a variável “Densidade às Estradas”. Os resultados obtidos com este modelo poderiam ser alvo de uma extrapolação futura, isto é, na construção de um modelo futuro dado a capacidade preditiva do modelo, nomeadamente nos valores de área afetada nas classes de adequabilidade mais elevada.

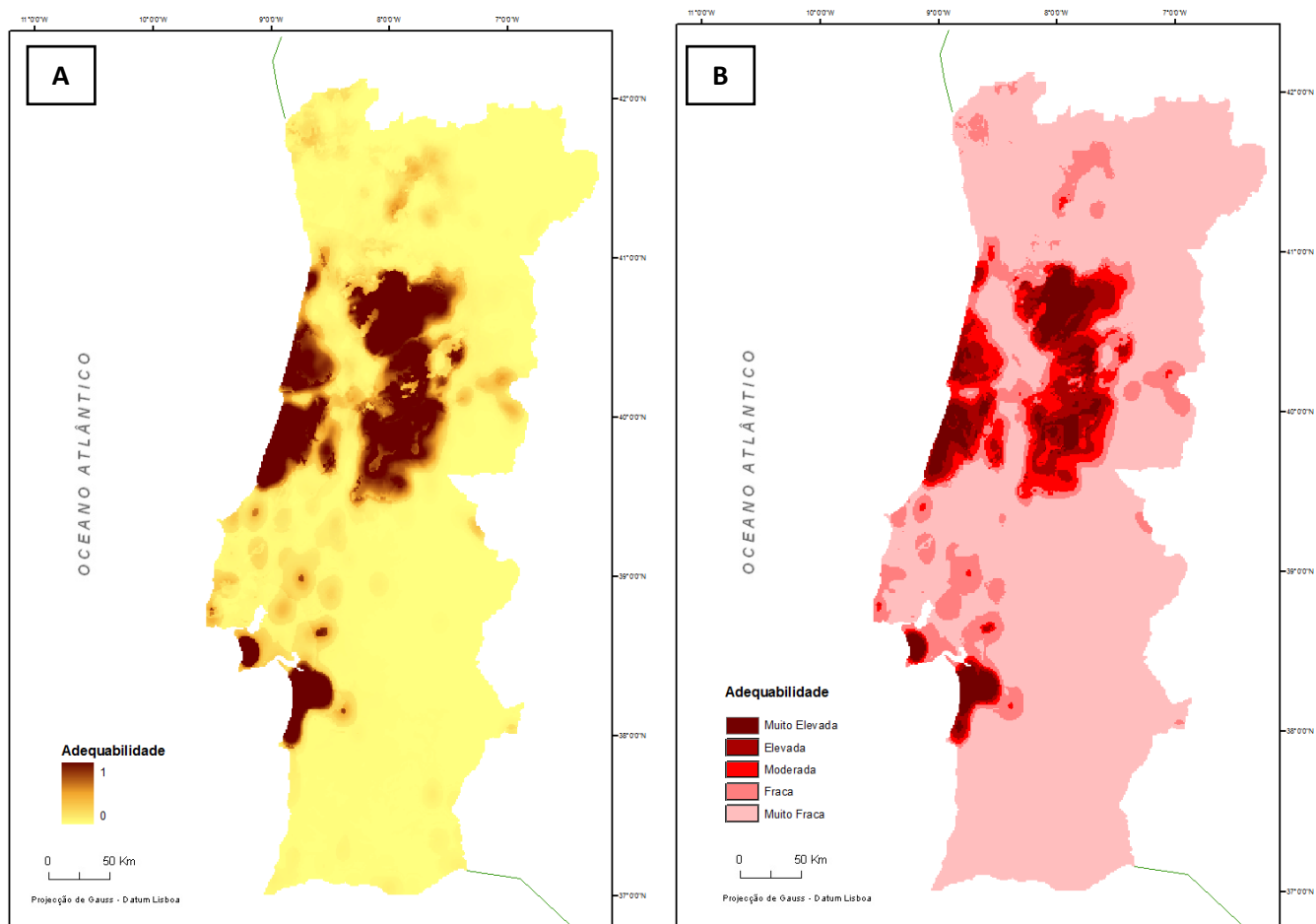


Figura 14 – Probabilidade Preditiva de condições adequadas à presença do NMP em valores contínuos (A) e classificada (B).

Quadro IX – Percentagem de área afetada em cada uma das classes de adequabilidade para o modelo correlativo.

Classes	Classes de Adequabilidade	% de ocupação das áreas afetadas	% de Área do Território Nacional
0 – 0,2	Muito Fraca	3	75
0,2 – 0,4	Fraca	8	10
0,4 – 0,6	Moderada	13	6
0,6 – 0,8	Elevada	27	5
0,8– 1	Muito Elevada	49	4

No cálculo da expansão a partir do local de contágio para o Modelo Correlativo Maxent, constatou-se que os valores finais unitários de custo são muito semelhantes aos do Modelo de custo da Adequabilidade Bioclimática, além do resultado final ter consideráveis similitudes ao nível das classes de distância-custo. Contudo, constata-se uma menor distância-custo no distrito de Leiria comparativamente ao modelo bioclimático.

Ao nível da validação, este modelo é comparável ao modelo de Expansão. A não introdução deste modelo para o cálculo do modelo de expansão deveu-se à semelhança dos resultados, ou seja, seria redundante acrescentar este modelo para a modelação da expansão já que os valores unitários de custo são praticamente idênticos bem como a sua dispersão geográfica. No quadro (X) nota-se o mesmo princípio do modelo de expansão, ou seja, uma distância-custo baixa com grande percentagem de ocupação das áreas afetadas (18%) com a menor porção do território em relação às outras classes e, posteriormente, um decréscimo para logo a seguir um aumento resultante das áreas afetadas nas NUT III Pinhal Interior Norte e Sul. Note-se que a distribuição não é regular, mas em grande parte devido aos motivos mencionados no ponto 2.6.2.

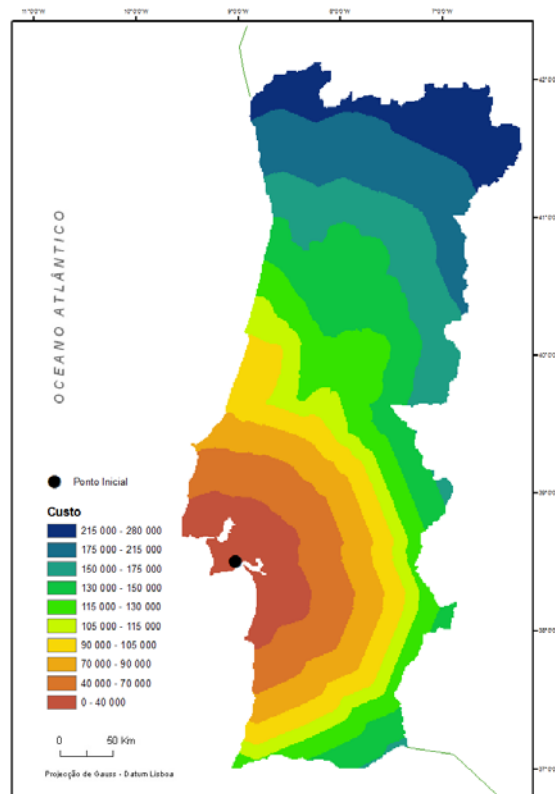


Figura 15 - Superfície de distância-custo a partir do local de contágio, com base no Modelo Correlativo

Quadro X – Percentagem de área afetada (2011) em cada uma das classes do Modelo Correlativo de Custo.

Classes de distância-custo	% de ocupação das áreas afetadas	% de Área do Território Nacional
0 – 40 000	19	7
40 000 – 70 000	2	11
70 000 – 90 000	1	9
90 000 – 105 000	12	9
105 000 – 115 000	26	8
115 000 – 130 000	15	11
130 000 – 150 000	20	14
150 000 – 175 000	3	11
175 000 – 215 000	1	11
215 000 – 280 000	1	9

Capítulo 3 – Modelo Gravítico de atração do Nemátodo da Madeira do Pinheiro: breve ensaio

3.1. Introdução

Hoje em dia a introdução de espécies invasoras em certos países está diretamente relacionada com a ação humana. A ação humana promove não só a introdução mas também a expansão da distribuição de uma espécie a longa distância (Robinet *et al.*, 2009). Ainda de acordo Robinet *et al.* (2009) este tipo de ação determina, na sua quase totalidade, a dispersão de uma espécie invasora e é devido ao movimento das pessoas, carros e camiões que a probabilidade de movimentar insetos infetados ou madeira infetada aumenta exponencialmente. Atualmente existem diversos estudos (Prasad *et al.*, 2009; Robinet *et al.*, 2009) sobre a ação humana como agente vetor na transmissão de espécies invasoras para áreas até então não invadidas.

O caso do nemátodo não difere do que tem ocorrido com outras espécies. A sua introdução em Portugal, como dito anteriormente, deveu-se à ação humana. As atividades humanas, tais como, abate e comércio de madeira, aumentam o risco de transporte accidental de materiais infestados que podem ser responsáveis por a rápida dispersão do nemátodo (Robinet *et al.*, 2009). Por este facto, foi elaborado nesta dissertação um modelo que determina o potencial do território nacional em função de duas medidas de densidade e de uma distância. Este modelo foi baseado no modelo gravítico de Huff mas, devido ao facto de não ser possível obter todos os parâmetros, optou-se por um cálculo simplificado. Sendo assim, o objetivo deste penúltimo capítulo é produzir um modelo gravítico que determine a atratividade que as áreas no território nacional têm em possuir áreas afetadas pelo NMP.

3.2. Modelo Gravítico

A lei da gravidade proposta por *Sir* Isaac Newton em 1687 e completa por Albert Einstein em 1915 tem a seguinte definição, “a atração entre duas massas é diretamente proporcional ao produto das suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da sua distância”.

A extrapolação da ideia da aplicação do método gravítico para o estudo da relação entre massas variando em função da distância e a sua incorporação nos princípios de interação espacial utilizados na Geografia (Hagget, 2001) foi devido a John Stewart

num estudo de fluxos intercidades. Seguidamente, à aplicação deste modelo, em estudos geográficos, outros autores optaram pela utilização do mesmo, nomeadamente Ravenstein em 1920 e W. J. Reilly em 1929 (Haggett, 2001).

O cálculo deste modelo incidiu numa versão simplificada do modelo gravitacional de Huff. Este tipo de modelo consiste num modelo gravitacional, no sentido em que utiliza as noções de distância (distância às estradas) e massa (densidade de atividade e a densidade de coníferas), sendo considerado probabilístico na medida em que calcula a probabilidade do nemátodo, situado no ponto i , se deslocar para uma determinada área, situada no ponto j (Huff, 2003).

$$P_{ij} = \frac{A_j^\alpha D_{ij}^{-\beta}}{\sum_{j=1}^n A_j^\alpha D_{ij}^{-\beta}}$$

Em que:

A_j é a medida de atratividade de uma local j , como o seu tamanho;

D_{ij} é a distância entre i a j ;

α é um parametro de atratividade estimado por observações empíricas;

β é a diminuição da distância através de observações empíricas;

n é o numero total de locais incluindo o local j .

Atualmente existem estudos (Prasad *et al.*, 2009 e Jacobs *et al.*, 2009) em que este modelo foi aplicado no estudo da modelação e dispersão de espécies. De acordo Prasad *et al.* (2009), ao contrário dos modelos típicos de dispersão de espécies, o modelo gravítico assume explicitamente que os movimentos não são aleatórios mas sim atraídos pelas localizações sendo que permitem a predição a longa distância por considerar, não só, a natureza da fonte da população, mas também a configuração espacial e natureza do potencial colonizador da mesma.

O modelo gravitacional tem o potencial de prever, de forma mais precisa, os movimentos de espécies através de paisagens heterogéneas do que os modelos difusos que, explicitamente, não consideram o padrão espacial da distância entre locais (Bossenbroek *et al.*, 2001, cit. em Prasad *et al.*, 2009).

O modelo foi elaborado a partir dos dados estatísticos referentes às indústrias madeireiras a operar em Portugal, nomeadamente através da informação proveniente dos anuários estatísticos do Instituto Nacional de Estatística (INE) para o ano de 2009. A informação recolhida foi ao nível do concelho tendo sido selecionados, os campos referentes às atividades económicas, os que incorporam dados estatísticos pertencentes à indústria transformadora da madeira, nomeadamente os campos Indústrias da madeira e da cortiça e suas obras, excepto mobiliário fabricação de obras de cestaria e de espartaria; Fabricação de pasta, de papel, cartão e seus artigos (Figura 16A). Estes dados, depois de incorporados num SIG, foram ponderados pela área do concelho onde se inserem por forma a produzir uma densidade de atividade (Figura 16B). Foi também utilizada neste modelo a informação cartográfica relativa à densidade de coníferas e a distância às estradas. O algoritmo utilizado para calcular o modelo, tal como descrito anteriormente, foi o algoritmo de Huff mas de forma simplificada; por exemplo, foram utilizadas duas medidas de atratividade (Densidade de Coníferas e Densidade de Atividade) e uma medida de distância (Distância às Estradas) com igual ponderação. Tanto as observações empíricas como as distâncias entre locais afetados não foram utilizadas devido à inexistência dessa informação. A não utilização destes dados não permite calcular a totalidade do modelo de Huff, mas apenas uma versão simplificada da mesma e em que a distância às estradas foi utilizada como uma medida de fluxo entre os diversos locais. A não utilização da adequabilidade climática neste modelo foi derivado da necessidade de utilizar uma medida de densidade e não de adequabilidade. Outra da justificação foi devido à tentativa de compreensão em que medida a densidade de coníferas conjugada com a atividade da indústria da madeira poderia justificar os lugares de maior atratividade à fixação do NMP.

O cálculo do modelo gravítico aplicado ao potencial económico da indústria da produção madeireira como fator de atração da espécie *Bursaphelenchus xylophilus* é inovador porque até ao momento não existem estudos, pelo menos publicados, que indiquem que este modelo tenha sido utilizado no estudo da dispersão do NMP devido a fatores humanos.

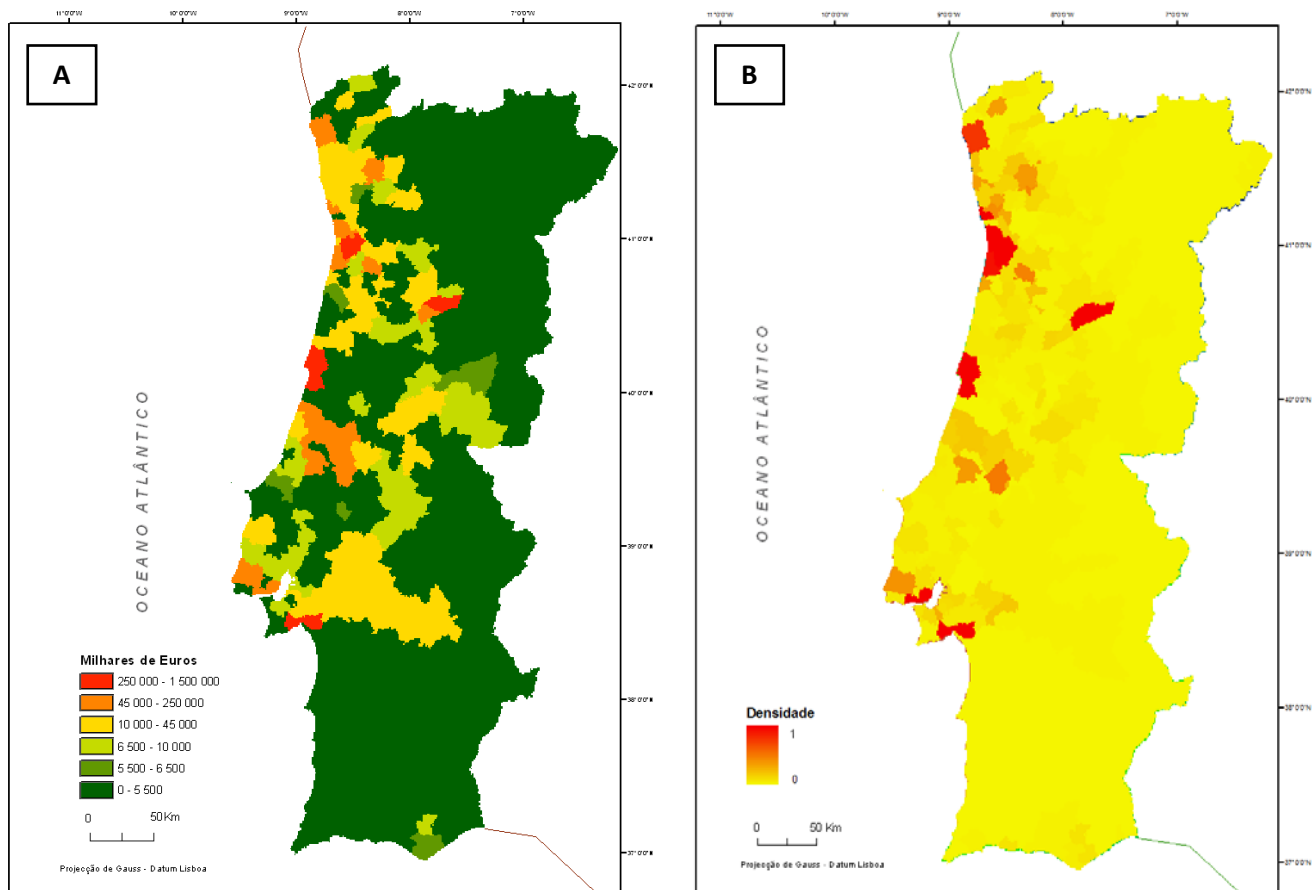


Figura 16 – Valores em milhares de euros das Atividades Económicas da Indústria Madeireira por concelho (A) e Densidade de Atividade da Indústria Madeireira por Concelho (B).

Os resultados obtidos (Figura 17) não foram os esperados apesar de várias tentativas e calibração do modelo com os dados disponíveis. As áreas de atratividade classificadas como “fracas” detêm os maiores valores de presença da espécie afetada (Quadro XI). Apesar da atribuição e teste de ponderações às variáveis utilizadas no cálculo deste modelo as duas classes de maior atratividade ocupam apenas 3% do território nacional com uma área afetada de 9%. Estes resultados obtidos contradizem alguns dos resultados dos modelos anteriores, nomeadamente em áreas em que a adequabilidade à presença do NMP era bastante elevada e neste modelo foram classificadas com atratividade fraca como, por exemplo, o litoral Norte Alentejano que foi umas das primeiras áreas a ser afetada devido à proximidade do foco inicial e à conjugação das condições climáticas com a existência de coníferas. Esta situação tem uma justificação, nomeadamente os valores de atividade madeireira que, nessa área, são nulos. Enquanto na Península de Setúbal encontramos áreas que vão deste atratividade “Fracas” até

“Muito Elevada”, devido aos valores de produção madeireira, no litoral Norte Alentejano essa situação não ocorre originando grandes áreas de atratividade “Muito Fraca”. Em suma, após a obtenção destes resultados, questiona-se a utilização do indicador da atividade madeireira como factor de fixação do NMP, ponderando até que ponto o transporte de madeira entre as várias zonas do país não seja um fator mais importante para a disseminação do NMP do que a própria localização das indústrias. Tal como foi mencionado neste capítulo, a inexistência de dados de transporte de madeira entre vários pontos das áreas afetadas e as respetivas indústrias, originou que o modelo não fosse calculado na sua totalidade não podendo concluir até que ponto a sua inclusão não teria alterado substancialmente os resultados finais.

As ilações que podem ser tiradas deste modelo são que os dados utilizados não foram suficientes para obter um modelo com resultados mais favoráveis. Além do facto que apresentam muitos falsos positivos, nomeadamente zonas de grande atração devido aos valores da indústria madeireira em alguns concelhos mas que na realidade o volume de produção da madeira hospedeira é bastante fraco ou inexistente.

Outra ilação é que em determinados Concelhos ou Distritos em que existe uma grande atividade madeireira, por exemplo o Distrito de Lisboa e Porto, a densidade de coníferas é bastante fraca não existindo grandes condições para o desenvolvimento do NMP. Isto significa que apesar de haver uma grande atividade económica da Indústria Madeireira nesses distritos não significa que exista uma elevada densidade de coníferas que, por sua vez, não significa necessariamente zonas afetadas.

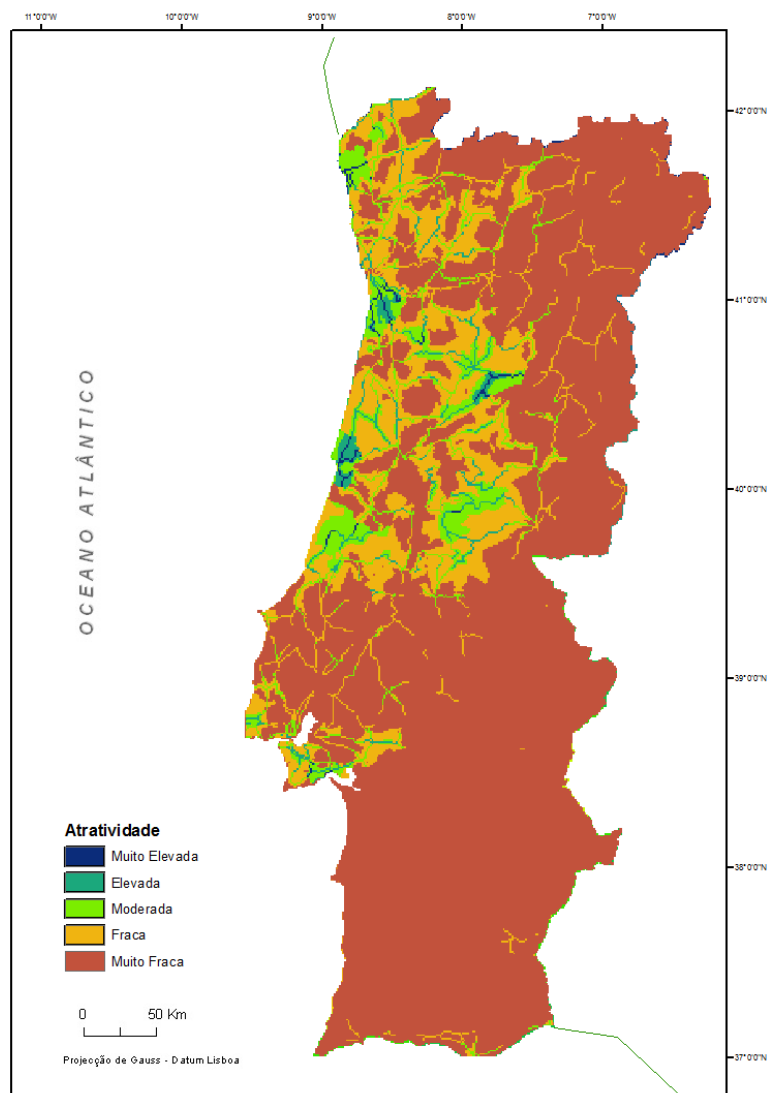


Figura 17 – Modelo de Atratividade gerado com base no Modelo Gravítico.

Quadro XI – Percentagem de área afetada em cada uma das classes de atratividade para o modelo gravítico.

Classes	Classes de Atratividade	% de ocupação das áreas afetadas	% de Área do Território Nacional
0 – 0,001	Muito Fraca	31	76
0,001 – 0,02	Fraca	40	15
0,02 – 0,40	Moderada	20	6
0,40 – 7	Elevada	8	2
7 – 120	Muito Elevada	1	1

Capítulo 4 – Considerações finais

Os modelos elaborados nesta dissertação permitiram concluir que existem grandes áreas em Portugal Continental suscetíveis de serem afetadas pelo NMP. Esta situação deve-se, essencialmente, a uma distribuição espacial significativa dos pinhais (o pinheiro-bravo constitui 40% da área florestal de Portugal Continental), mas também ao facto de não existirem limitações importantes impostas pelas condições climáticas. Por isso, apesar das medidas mitigadoras implementadas para a sua contenção, após a sua introdução em Portugal, em 1999, o NMP tem tido uma grande expansão geográfica, como provam os editais publicados.

A informação obtida para esta dissertação foi referente a um espaço temporal de 5 anos (não contando com 1999, ano da sua deteção em Portugal) e teve três períodos de análise distintos, os quais permitem identificar três fases distintas de evolução: o primeiro (entre 1999 e 2006) corresponde a uma expansão quase contígua a partir do foco inicial de contágio; o segundo (de 2006 a 2009) caracteriza-se pela dispersão, com o aparecimento de vários focos secundários, alguns bastante distantes entre si (como, por exemplo, no distrito de Vila Real, o único a norte do rio Douro); o terceiro (identificado pelo edital de 2011) corresponde a um alastramento a partir das áreas já existentes.

Todavia, há que referir a existência de alguma margem de incerteza em relação aos dados das ocorrências do NMP; por um lado, algumas manchas de pinhal, em particular a sul do rio Tejo, incorporam outras espécies de coníferas para além do pinheiro-bravo, em particular o pinheiro-mansinho; por outro, não é garantido que os dados de presença correspondam a árvores afetadas, mas apenas a manchas que estão incluídas em concelhos afetados pelo NMP.

Os resultados obtidos pelos modelos de Adequabilidade Climática e de Bioclimática (e a Superfície de Expansão obtida a partir deste último) permitiram determinar a expansão do NMP, baseando-se em modelos de adequabilidade, dado que o fenómeno em estudo tem uma origem geográfica bem definida a partir da qual se iniciou a sua propagação. No caso dos resultados obtidos pela Adequabilidade Climática verificou-se que Portugal Continental tem uma elevada adequabilidade à presença da espécie em quase toda a totalidade do território, visto que não existem condições de temperatura e precipitação que sejam claramente limitativas do seu desenvolvimento. É importante referir que os resultados obtidos representam a adequabilidade do NMP e não do inseto vetor essencial para a propagação do NMP.

Com a introdução da “Densidade de Coníferas” como variável independente, produz-se um modelo bioclimático; constatou-se, com base neste modelo, que o País, em algumas áreas com grandes manchas de coníferas tem uma elevada adequabilidade climática, ou seja, provoca grandes áreas com elevada adequabilidade à presença do NMP, excepção das NUT III Alentejo Central e Baixo Alentejo. Grande parte dessas áreas, com grandes valores de suscetibilidade, encontram-se atualmente afetadas sendo que as áreas adjacentes começam também a ser afetadas como provam os editais de 2011. Este modelo, quando validado com os dados das ocorrências, permitiu identificar cerca de 30% de áreas afetadas em apenas 4% do território com maior adequabilidade. Verifica-se, assim, que a integração entre um modelo climático e a distribuição espacial da espécie hospedeira, traduzu-se na obtenção de resultados bastantes interessantes.

De notar, também, que os resultados obtidos a partir do modelo de Adequabilidade Bioclimática se encontram em consonância com os resultados obtidos a partir do modelo correlativo (através do *software* Maxent). Os resultados obtidos neste modelo mostraram a quase totalidade da área afetada dentro das classes definidas com a maior adequabilidade, o que se traduz em grandes manchas de máxima probabilidade preditiva de condições adequadas à presença do NMP em zonas já afetadas. O resultado deste modelo baseou-se na utilização de dados de presença, constituindo uma alternativa aos modelos de adequabilidade anteriores; todavia, estes dados de presença não foram obtidos diretamente a partir dos registos de árvores afetadas, pois não foi possível ter acesso a essa informação, pelo que optou-se por uma abordagem aleatória, dentro das zonas afetadas, para a obtenção de dados de presença. Desta análise correlativa há também a realçar a aparente importância relativa da distância às estradas na dispersão do NMP, facto que justifica a sua utilização em três dos modelos gerados nesta tese. Com a integração da “Distância às Estradas” nos modelos tentou-se, essencialmente, encontrar justificação para as manchas dispersas de áreas afetadas que se tornam visíveis em 2009, objetivo este que não foi inteiramente conseguido.

Como a presença do NMP não se estende a todo o território, pois está dependente do foco inicial de contágio, utilizaram-se modelos de expansão a partir desse local, tendo como fatores de atrito as variáveis independentes já referidas. O modelo de expansão permitiu certificar que uma parte significativa das áreas afetadas tem relação com a proximidade às estradas indicando a existência de alguma relação entre estas variáveis, facto que reforça o papel do ser humano como agente difusor de espécies invasoras.

O cálculo do modelo gravítico, geralmente utilizado para estudos de Geografia Humana, nomeadamente de natureza económica, para explicar tendências e padrões de consumo e de fixação das populações, constituiu um pequeno ensaio neste trabalho. Nesta dissertação optou-se por utilizá-lo na modelação de uma espécie invasora e, ao contrário dos outros modelos calculados ao longo da dissertação, incide sobre valores de atratividade e não em valores de adequabilidade, isto é, em áreas onde a existência de indústria madeireira possa servir como fator de fixação do NMP através do transporte de madeira infetada e do seu volume de negócios. A grande desvantagem na utilização deste modelo para o estudo em questão esteve relacionado com as limitações dos dados utilizados, o que poderá explicar a pouca relevância dos resultados alcançados. Para uma elaboração correta deste modelo teriam sido necessários, por exemplo, volume de negócios das indústrias madeireiras de Pinheiro Bravo a sua localização geográfica e os percursos de transporte de madeira abatida de vários pontos do País. Os que foram obtidos para esta dissertação têm uma escala de análise ao nível do concelho e consideram todo o tipo de indústria madeireira não fazendo a sua distinção o que pode originar falsos positivos, ou seja, valores económicos de produção elevados mas que sejam relacionados com diferentes espécies, tais como Eucalipto ou Sobreiro. O modelo gravítico aplicado à modelação de espécies invasoras é relativamente recente e inovador; prova disso foram as duas únicas referências bibliográficas encontradas que explicam o cálculo do mesmo neste contexto. No entanto, o tipo de informação de *input* utilizada nesses trabalhos permite a obtenção de resultados mais consistentes, já que, por exemplo, no artigo de Prasad *et al.*, (2009) a informação de base consiste em volume de tráfego e rotas entre os locais afetados. Este tipo de dados, a ser obtido em Portugal, requeriria inquéritos, dados económicos das empresas madeireiras que trabalham com coníferas e estradas utilizadas no transporte de madeira entre os diversos locais. Diga-se, a este propósito, que o papel do transporte de madeira de pinheiro-bravo pode ser mais relevante para a contaminação dos concelhos atravessados, desde que estes apresentem as condições necessárias ao desenvolvimento do NMP, do que para os concelhos de destino. Estes dados, a serem obtidos, certamente seriam alvo de um trabalho futuro que possibilitasse estudar o papel do ser humano como agente difusor de espécies invasoras.

A utilização de MDE através de SIG, nesta dissertação, demonstrou, apesar de algumas limitações a ultrapassar, o potencial deste tipo de modelação na elaboração de modelos

espaciais que permitem determinar áreas de adequabilidade a uma espécie, quer através do conhecimento do comportamento da espécie quer através da utilização de dados de presença da mesma. Estes tipos de modelos, utilizados em conjugação com medidas mitigadores por parte de entidades públicas ou privadas, constituem-se uma mais-valia que pode efetivamente reduzir a propagação de uma espécie invasora temporal e espacialmente. Uma elaboração prévia de um MDE funciona como um produto base que pode ajudar na adoção de medidas mitigadoras e reduzir grandemente o impacto económico e até mesmo de saúde que uma espécie invasora pode originar.

Referências bibliográficas

Akbulut, S., Yüksel, B., Baysal, I., Vieira, P., Mota, M. (2008). PineWilt Disease: A Threat to Pine Forests in Turkey? In M. M. Mota, P. Vieira (eds.), *Pine Wilt Disease: A Worldwide Threat to Forest Ecosystems*. Springer: 59-67.

Almeida, A., Galão, R., Sousa, C., Novo, M., Parreira, R., Pinto, J., Piedade, J., Esteves, A. (2008). Potential mosquito vectors of arboviruses in Portugal: species, distribution, abundance and West Nile infection. *Transactions of The Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 102: 823-832.

Caetano, M., Nunes, V., Nunes, A. (2009). Nomenclatura CORINE Land Cover. Instituto Geográfico Português

Capinha, C. (2008). Modelação Espacial de Adequabilidade de Habitat a Espécies Invasoras: o *Carpobrotus Edulis* em terreno não dunar. *Finisterra*, XLIII, 86: 53-68.

Capinha, C. (2009). O Mosquito vetor da Malária *Anopheles Atroparvus*, Van Thiel, 1927: Adequabilidade de habitat em Portugal continental e potenciais alterações futuras do seu espaço climático. Tese de Mestrado apresentada à Faculdade de Letras, Universidade de Lisboa.

Cram, M., Hanson, J. (SD). How to identify and Manage Pine Wilt Disease and Treat Wood Products Infested by the Pinewood Nematode. United States Department Agriculture (Consultado a 5 de Abril de 2011). http://www.na.fs.fed.us/spfo/pubs/howtos/ht_pinewilt/pinewilt.htm

Daub, M. (2008). Investigations on pathogenicity, invasion biology and population dynamics of the Pine Wood Nematode *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner and Buhrer 1934) Nickle 1970 in European conifers. Tese de Mestrado apresentada ao Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität. <http://hss.ulb.uni-bonn.de/2008/1468/1468.pdf>

Dwinell, L. (2001). Potential Use of Elevated Temperature to Manage Pests in Transported Wood. *APSnet* (Consultado a 27 de Dezembro de 2009). <http://www.apsnet.org/Pages/default.aspx>

Dwinell, L., Nickle W. (2004). An Overview of the Pine Wood Nematode Ban in North America. *Forest Pests: Insects, Diseases & Other Damage Agents* (Consultado a 7 de Janeiro de 2010). <http://www.forestpests.org/pinenematode/>

Elith, J., Graham, C., Anderson, R., Ferrier, M., Guisan, A., Hijmans R., Huettmann, F., Leathwick, J., Lehmann, A., Li, J., Lohmann, L., Loiselle, B., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nakazawa, Y., Overton, J., Peterson, A., Phillips, S., Richardson, K., Scachetti-Pereira, R., Schapire, R., Sobero, J., Williams, S., Wisz, M., Zimmermann, N. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29: 129-151.

Elith, J., Steven, J., Hastie., T., Dudík, M., Chee, Y., Colin, J., Yates. (2011). *A statistical explanation of Maxent for Ecologists* 17: 43 – 57.

EPPO. (1999) A1 and A2 Lists of Pests Recommended for Regulation as Quarantine.

Forestis. Nemátodo da madeira do pinheiro – ficha técnica (Consultado a 17 de Julho de 2009). www.forestis.pt/forestis/multimedia/File/ficha_NMP_1.pdf

Guisan, A., Thuiller, W. (2005). Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8: 993-1009.

Haggett, P. (2001). *Geography, A global synthesis*. Prentice Hall, London: 402-404.

Hijmans, R., Cameron, S., Parra, J., Jones, P., Jarvis, A. (2005). Very High Resolution Interpolated Climate Surfaces For Global land Areas. *International Journal of Climatology*, 25: 1965-1978.

Huff, D.L. (2003). Parameter Estimation in the Huff Model. *ArcUser*, October-December, 34-36.

Hutchinson, G. (1957). Concluding remarks. Cold Spring Harbor Symposium on Quantitative. *Biology*, 22: 415-457.

Instituto Nacional de Estatística. (2010). Anuário Estatístico da Região Algarve 2009.

Instituto Nacional de Estatística. (2010). Anuário Estatístico da Região Alentejo 2009.

Instituto Nacional de Estatística. (2010). Anuário Estatístico da Região Lisboa 2009.

Instituto Nacional de Estatística. (2010). Anuário Estatístico da Região Centro 2009.

Instituto Nacional de Estatística. (2010). Anuário Estatístico da Região Norte 2009.

Jacobs, M., Macisaac, H. (2009). Modeling spread of the invasive macrophyte *Cabomba caroliniana*. *Freshwater Biology* 54, 296-305

Lawson, S., Sathyapala, S. (2008). The Risk of Pine Wilt Disease to Australia and New Zealand. In M. Mota, P. Vieira (eds.) *Pine Wilt Disease: A Worldwide Threat to Forest Ecosystems*. Springer.

Linit, M. (2001). Vetor Relationships in the Pine Wilt System. *APSnet* (Consultado a 27 de Dezembro de 2009).

Longley, P.A., M.F. Goodchild, D.J. Maguire, and D.W. Rhind, (2005). *Geographic Information Systems and Science*. Second Edition. New York: Wiley.

Mackey, G., Mullen, I., Baldwin, K., Gallant, J., Sims, R., Mckenney, D. (2000). Toward a Spatial Model of Boreal Forest Ecosystems: The role of Digital Terrain Analysis, In J. Wilson & J. Gallant (eds.) *Terrain Analysis: Principles and applications*. John Wiley & Sons, New York: 391-421.

Ministério da Agricultura e do Desenvolvimento Rural e das Pescas, (2009). Ponto de Situação Nemátodo da Madeira do pinheiro (Consultado a 14 de Março de 2010).

Ministério da Agricultura, do Mar, do Ambiente e do Ordenamento do Território, (2011). Decreto-Lei n.º 95/2011, de 8 de Agosto. D.R. n.º 151, Série I.

Mota, M., Braasch, H., Bravo, M., Penas, A., Burgermeister, W., Metge, K., Sousa, E. (1999). First report of *Bursaphelenchus Xylophilus* in Portugal and in Europe. *Nematology*, 1 (7/8): 727-734.

Mota, M., Vieira, P. (2008). *Pine Wilt Disease: A Worldwide Threat to Forest Ecosystems*. Springer.

Mota, M., Futai K., Vieira P. (2009). Pine Wilt Disease and the Pinewood Nematode, *Bursaphelenchus Xylophilus*, In A. Ciancio & K. Mukerji (eds.) *Integrated Management of Fruit Crops and Forest Nematodes*. Volume 4, Section 2, 253-274.

Naves, P., Sousa E., Rodrigues J. (2008). Biology of *Monochamus galloprovincialis* (Coleoptera, Cerambycidae) in the Pine Wilt Disease Affected Zone, Southern Portugal. *Silva Lusitana*, 16(2): 133-148.

Okland, B. Skarpaas, O. Schroeder, M. Magnusson, C. Lindelow, A. Thunes, K. (2010). Is Eradication of the Pinewood Nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*) Likely? An Evaluation of Current Contingency Plans. *Risk Analysis*, Volume 30, Issue 9: 1424 – 1439.

Pearson, R. (2007). Species Distribution Modeling for Conservation Educators and Practitioners. American Museum of Natural History (Consultado a 12 de Maio de 2010). http://biodiversityinformatics.amnh.org/files/SpeciesDistModelingSYN_1-16-08.pdf

Phillips, S. J., Anderson, R. P., Schapire, R. E. (2006). Maximum Entropy Modeling of Species Geographic Distributions. *Ecological Modeling* 190: 231 – 259.

Phillips, S. J., Dudik. M., Schapire, R. E. (2004). A maximum entropy approach to species distribution modeling. Proceedings of the Twenty – First International Conference on Machine Learning. ACM Press, New York, pp. 472 – 486.

Phillips, S. J., Dudik, M. (2008). Modeling of Species Distributions with Maxent: New Extensions and a Comprehensive Evaluation. *Ecography* 31: 161 – 175.

Phrame. (2007). Development of improved pest risk analysis techniques for quarantine pests, using pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, in Portugal as a model system. Forestry Commission.

Portaria nº 103/2006 de 6 de Fevereiro. Diário da República, 1.^a série – B – N.º 26.

Portaria nº 553-B/2008 de 27 de Junho. Diário da República, 1.^a série – N.º 123.

Portaria n.º 652-A/2010 de 09 de Agosto. Diário da República, 1.^a série – N.º 153.

Prasad, A., Iverson, L., Peters, M., Bossenbroek, J., Matthews, S., Sydnor, T., Schwartz, M. (2009). Modeling the invasive emerald ash borer risk of spread using a spatially explicit cellular model. *Landscape ecology*. 25: 353 – 369.
http://www.nrs.fs.fed.us/pubs/jrnl/2010/nrs_2010_prasad_001.pdf

Ribeiro, H., Pires, C., Capela, R. (1988). An annotated checklist of the mosquitoes of continental Portugal (*Diptera Culicidae*). *Actas do III congresso Ibérico de entomologia*, 233-253.

Robinet, C., Roques, A., Pan, H., Fang, G., Ye, J., Zhang, Y., Sun, J. (2009). Role of Human-Mediated Dispersal in the Spread of the Pinewood Nematode in China. *Plos One* (Consultado a 15 de Junho de 2010).
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2645708/>

Rodrigues, J. (2008). National Eradication Programme for the Pinewood Nematode, *In* M. M. Mota, P. Vieira (eds.) *Pine Wilt Disease: A Worldwide Threat to Forest Ecosystems*. Springer: 5-14.

Rubio, D., Gonzalo, Acosta, E., Luis. (2011). Geographical distribution of the space-weaving spider, *Chibchea salta*, from northwestern Argentina: New records and bioclimatic modeling. *Journal of Insect Science*: Vol II Article 54.

Rutherford, T., Webster, J. (1987). Distribution of pine wilt disease with respect to temperature in North America, Japan and Europe. *Canadian Journal of Forest Research*, 17: 1050-1059.

Sathyapala, S. (2004). Pest Risk Analysis Biosecurity Risk to New Zealand of Pinewood Nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*). Ministry of Agriculture and Forestry of New Zealand.

Segurado, P., Araújo, M. (2004). An evaluation of methods for modeling species distributions. *Journal of Biogeography*, 31: 1555-1568.

Sousa, E., Naves, P., Bonifácio, L. (2009). Programa de investigação: Nemátodo, Hospedeiro e Vetor. Associação florestal de Portugal (Consultado a 15 de Abril de 2010). <http://www.forestis.pt/destaques,0,224.aspx>

Steiner, G.; Ruhner, E. (1934). *Aphelenchoides xylophilus*, a nematode associated with blue-stain and other fungi in timber. *Journal of Agriculture Research*, 48: 949-951.

Tomiczek, C., Hoyer-Tomiczek, U. (2008). Biology Studies Relevant to the Vetor Role of *Monochamus* Species for PineWood Nematode, In M. M. Mota, P. Vieira (eds.) *Pine Wilt Disease: A Worldwide Threat to Forest Ecosystems*. Springer: 215-220.

United States Department of Agriculture Animal and Plant Health Inspection Service. (2010). Risk Assessment of the Movement of Firewood within the United States. USDA.

Vázquez, D. (2005) Reconsiderando el nicho hutchinsoniano. *Ecología Austral*, 15: 149-158